

***Università di Pisa***

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

***Corso di Laurea Specialistica in Fisica Applicata***

Anno Accademico 2004 – 2005

***Tesi di Laurea Specialistica***

**Calibrazione e caratterizzazione di uno  
Spettroradiometro**

Candidato

***Anna Fabozzi***

Relatore

***Dr. Emilio Simeone***

Relatore interno

***Prof. Nicolò Beverini***

# INDICE

INTRODUZIONE.....	3
1    CONCETTI GENERALI.....	5
1.1    Radiazione elettromagnetica.....	5
1.2    Unità di misura e nomenclatura .....	7
1.3    Irradianza spettrale.....	11
1.3.1    Connessione con la teoria elettromagnetica.....	13
1.3.2    Legge di Lambert e legge dell'inverso del quadrato della distanza.....	13
1.4    Sorgenti di radiazione misurate.....	15
1.4.1    Il sole.....	16
1.4.2    Lampada alogena .....	19
1.4.3    Lampada al mercurio .....	21
2    APPARATO STRUMENTALE .....	23
2.1    Cenni sulla catena strumentale.....	23
2.2    Reticolo di diffrazione .....	26
2.2.1    Reticolo olografico concavo .....	30
2.3    Rivelazione della radiazione .....	34
2.3.1    Tipi di rivelatori .....	36
2.3.2    Rivelatori multicanale.....	38
2.4    Lo spettroradiometro.....	40
3    CALIBRAZIONE.....	46
3.1    L'equazione di misura.....	46
3.2    Calibrazione .....	51
3.2.1    Calibrazione spettrale SAIR.....	51
3.2.1.1    Procedura operativa.....	55
3.2.1.2    Analisi dei dati .....	56
3.2.2    Calibrazione radiometrica SAIR.....	68
3.2.2.1    Procedura operativa.....	70
3.2.2.2    Analisi dei dati .....	72
3.2.3    Analisi degli errori sulla calibrazione SAIR.....	83
3.2.4    Calibrazione radiometrica SMED.....	85
3.2.4.1    Analisi dei dati .....	86
4    CARATTERIZZAZIONE SMED .....	90
4.1    Introduzione .....	90
4.2    Ripetibilità della misura .....	91
4.2.1    Conclusioni .....	96
4.3    Errori direzionali e di posizione.....	96
4.3.1    Conclusioni .....	103
4.4    Stima della stray light .....	103
4.5    Verifica della legge coseno .....	111
4.5.1    Conclusioni .....	114
4.6    Instabilità in $\lambda$ .....	114
4.6.1    Conclusioni .....	117
4.7    Stabilità del rivelatore .....	118
4.7.1    Conclusioni .....	120
4.8    Stabilità della sorgente NIST .....	120

4.8.1	Conclusioni .....	123
4.9	Conclusioni .....	123
5	MISURE DI ALBEDO .....	126
5.1	Introduzione .....	126
5.2	Misure di albedo in funzione dell'altezza del diffusore dal suolo .....	129
5.3	Albedi misurati.....	131
6	CONCLUSIONI .....	135
	BIBLIOGRAFIA.....	137

# INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con alcuni enti e strutture private, fra cui il CNR di Pisa (dipartimento di biofisica), A.R.P.A.T. di Pisa, oltre che naturalmente con la Flyby s.r.l. di Livorno.

Lo scopo principale è stato quello di calibrare e caratterizzare uno *spettroradiometro*, un dispositivo in grado di misurare sia la quantità di radiazione ottica che la distribuzione spettrale presente, e di effettuare con esso alcune misure di radiazione solare per ricavarne parametri importanti sia dal punto di vista ambientale che fotobiologico (quantità di ozono stratosferico e dosi efficaci di radiazione ultravioletta).

L'importanza della misurazione di queste quantità è data dalla necessità di capire e studiare approfonditamente la radiazione solare e soprattutto gli effetti che essa può provocare sull'uomo e sull'ambiente

Il lavoro di tesi è stato sviluppato in due fasi:

- *Calibrazione e caratterizzazione* dello spettroradiometro
- *Misure di albedo* nell'intervallo spettrale di misura dello spettroradiometro (da 290nm a 850nm).

Durante la prima fase è stata sviluppata una procedura di calibrazione dello spettroradiometro di proprietà del CNR prodotto e distribuito dalla stessa Flyby. Il CNR, oltre allo strumento da calibrare ha messo a disposizione una lampada alogena calibrata NIST che emette fra 250nm e 2400nm e un laboratorio munito di un banco ottico e attrezzato con strutture in grado di garantire un'opportuna distribuzione della luce.

La fase di calibrazione è stata svolta in due parti:

- *Calibrazione dello strumento in lunghezza d'onda* effettuata misurando con lo spettroradiometro la luce emessa da una lampada a mercurio in dotazione alla Flyby di Livorno.
- *Calibrazione in irradianza* utilizzando la lampada calibrata del C.N.R.

Successivamente è stata eseguita un'accurata analisi degli errori e delle caratteristiche fondamentali dello spettroradiometro.

Una volta definita e collaudata la procedura, è stato calibrato anche uno spettroradiometro di proprietà Flyby dotato di shutter automatico che permette di effettuare misure automatizzate.

Nella seconda fase della tesi, lo spettroradiometro è stato utilizzato per misurare l'albedo spettrale di superfici diverse per la caratterizzazione della quantità effettiva di radiazione UV che viene riflessa dal suolo. Le misure di albedo spettrale sono state eseguite sul territorio che va da Pisa a Tirrenia (PI). Anche questa parte è stata svolta in collaborazione con l'A.R.P.A.T. e lo scopo principale è stato quello di creare una mappa interattiva sul sito internet dell'A.R.P.A.T. stessa ([www.arp.at.toscana.it](http://www.arp.at.toscana.it)) che ha permesso agli utenti interessati, durante tutto il mese di agosto, di ottenere informazioni precise sulla quantità di radiazione UV che effettivamente raggiunge la persona nella zona indicata dall'utente e caratterizzata da una particolare riflettività del terreno. Le misure di albedo ottenute hanno interessato infatti diversi tipi di superfici, fra cui: erba, asfalto, sabbia, ghiaia, campi arati, terra battuta e campi di frumento.

Queste misure, oltre che alla stima dell'albedo in diverse condizioni di distribuzione spaziale della radiazione solare, sono servite anche per caratterizzare ulteriormente lo spettroradiometro che ha rivelato funzionare in maniera ottimale per lunghezze d'onda maggiori di 320 nm.

Nel presente lavoro, dopo una descrizione delle caratteristiche fisiche della radiazione elettromagnetica presentate nel Capitolo 1, saranno descritte e studiate nei Capitoli 2, 3 e 4 le caratteristiche dell'apparato sperimentale, mentre nel Capitolo 5 saranno presentati i risultati delle misure di albedo ottenute.

# **1 CONCETTI GENERALI**

## **1.1 Radiazione elettromagnetica**

Con la parola *radiazione* si intende l'energia che si propaga attraverso lo spazio. Ci riferiremo, attraverso tutto il presente lavoro, a *radiazione ottica*, intendendo con questa terminologia l'energia propagata in forma di onde elettromagnetiche che può essere riflessa, messa a fuoco o dispersa da elementi ottici come ad esempio lenti, prismi, reticoli e specchi.

Nello spettro della radiazione elettromagnetica, la radiazione ottica si estende sostanzialmente dai raggi X fino alle microonde, ossia da circa 1 nm a circa 1 mm.

All'interno di questo intervallo, lo spettro elettromagnetico è ulteriormente suddiviso in radiazione ultravioletta (UV), radiazione visibile (VIS) e radiazione infrarossa (IR) in ordine di lunghezza d'onda crescente. La lunghezza d'onda maggiore dello spettro UV è fissata a 400 nm mentre quella minore non è definita in modo univoco: il suo valore varia da 1 nm a 10 nm fino a 100 nm; tale ultimo valore sembra essere il più appropriato, essendo anche la lunghezza d'onda di confine fra le radiazioni ionizzanti e quelle non ionizzanti. L'energia corrispondente è di circa 12 eV, che è anche il valore del potenziale medio di ionizzazione di una molecola biologica [Gallo,1995].

Questa distinzione è comunque in questo contesto influente dal momento che la parte di spettro elettromagnetico fino a circa 180 nm è completamente assorbita

dall'aria e che le misure che verranno presentate sono state eseguite a terra e quindi in presenza di aria.

La radiazione elettromagnetica che si trova fra 1 nm e 100 nm viene chiamata *VacuumUltraViolet (VUV) o ultravioletto estremo*.

La regione spettrale ultravioletta è suddivisa in quattro intervalli: VUV (1 nm – 100 nm), UVC (100 nm – 280 nm), UVB (280 nm – 315 nm) e UVA (315 nm – 400 nm).

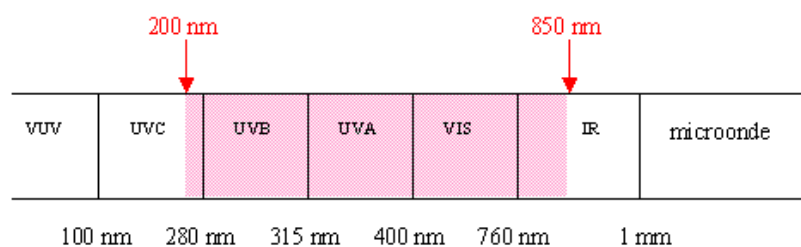
Le ragioni per la scelta dei confini di tali suddivisioni sono le seguenti:

- 100nm: corrisponde alla lunghezza d'onda di confine fra le radiazioni ionizzanti e quelle non ionizzanti.
- 280nm: la radiazione proveniente dal sole con lunghezza d'onda al di sotto di tale valore viene completamente assorbita dall'ozono.
- 315 nm: le componenti dello spettro solare rilevato a terra con lunghezza d'onda inferiore a tale valore e al di sopra di 280nm hanno un'alta attività biologica.
- 400nm: inizia la regione del VIS. In particolare la radiazione solare compresa fra 315nm e 400nm è meno biologicamente attiva di quella UVB.

L'intervallo spettrale della radiazione visibile è convenzionalmente compreso fra 400nm e 760nm. Al di sopra di tale valore si trova la regione detta infrarosso e si estende fino al millimetro.

Lo spettro infrarosso è suddiviso in tre parti, vicino infrarosso o NIR (NearInfraRed da 760nm fino a 5  $\mu$ m), infrarosso medio o MIR (MiddleInfraRed da 5 $\mu$ m a 30 $\mu$ m) e lontano infrarosso o FIR (FarInfraRed da 30 $\mu$ m a 1mm). La regione di infrarosso che verrà misurata la parte del NIR a lunghezza d'onda inferiore, fino a circa 850nm.

Nella Fig.1.1 viene riportato un disegno di una parte dello spettro elettromagnetico, con evidenziata la regione di interesse ai fini di questa tesi.



**Fig.1.1:** parte dello spettro elettromagnetico con in rosa evidenziata la porzione di spettro di interesse in questa tesi.

Tale regione è determinata dalla banda passante dello strumento utilizzato per effettuare le misure.

Richiamiamo qui i concetti fondamentali dell'ottica utilizzati nella presente tesi.

Per descrivere matematicamente l'evento studiato occorre utilizzare il modello descrittivo adeguato; la radiazione UV-VIS è caratterizzata dalle ridotte dimensioni della lunghezza d'onda  $\lambda$ . Nel limite per  $\lambda \rightarrow 0$ , le leggi di propagazione dell'ottica possono essere formulate in linguaggio geometrico e si può considerare l'energia essere trasportata lungo certe curve, dette *raggi luminosi* (light rays) [Born,1959]. L'*ottica fisica* (o *ottica ondulatoria*) tiene conto invece della natura ondulatoria della luce e quindi dei fenomeni di diffrazione e di interferenza. L'*ottica quantistica* viene coinvolta nell'ambito del funzionamento del sensore CCD dello spettroradiometro.

Per quanto riguarda il lavoro svolto durante questa tesi, è stato sufficiente utilizzare principalmente l'ottica geometrica con l'utilizzo occasionale dell'ottica ondulatoria e dell'ottica quantistica quando necessario.

Vengono ora date alcune definizioni generali sui concetti utilizzati.

La *radiometria* descrive e misura la radiazione elettromagnetica e la sua interazione con la materia. La *fotometria* misura anch'essa la radiazione elettromagnetica, riferita però alla risposta fisiologica dell'occhio umano [McCluney,1994].

La *spettroradiometria* misura la potenza della radiazione ottica in funzione della lunghezza d'onda [Kostkowski,1997]. La spettroscopia solare UV studia la quantità di radiazione UV, principalmente UVA e UVB, che incide sulla superficie della terra. Da questa misura è possibile ricavare importanti informazioni, sia sull'incidenza che tale radiazione ha sull'ambiente (la radiazione UV interferisce con le cellule viventi e con i processi di fotosintesi) e sull'uomo (la misura dell'albedo di varie tipologie di terreni e/o superfici ha permesso di valutare con più precisione la quantità di radiazione UV che incide a terra ed è responsabile di eritemi, cancro, cataratte etc.) che sul monitoraggio dell'andamento dello spessore dello strato di ozono ( $O_3$ ) atmosferico.

Nel prossimo paragrafo verranno presentate in dettaglio le grandezze radiometriche e spettroradiometriche con le relative unità di misura.

## **1.2 Unità di misura e nomenclatura**

Nel corso dei tempi si è sviluppato un ampio repertorio di unità di misura per la radiazione ottica a seconda dell'utilizzo che ne veniva fatto. Ad esempio, un ingegnere illuminotecnico, per poter definire una quantità di luce adeguata ad un



ambiente lavorativo, ha bisogno di misurare la luce in relazione alla risposta dell'occhio umano medio e utilizza come unità di misura il *lumen* (unità di misura fotometrica), mentre un ingegnere meccanico, avendo a che fare con dissipazione di calore attraverso l'attrito, sarà più interessato a sapere quanta energia viene irradiata da una certa superficie e quindi a conoscere la potenza della radiazione, espressa in Watt [Nicodemus,1979].

Ci sono quindi modi diversi per stabilire la quantità di radiazione ottica ottenuta durante una misura.

La Commissione Internazionale dell'Illuminazione (*Commission Internationale de l'Eclairage*, o CIE) ha standardizzato la nomenclatura relativa alle quantità radiometriche e tale terminologia è stata adottata anche nel presente lavoro.

A partire dalla definizione di *energia radiante*  $Q$ , verranno definite le quattro grandezze radiometriche principali. Essa è la quantità totale di energia emessa da una sorgente di luce ed è espressa in Joule. Se non diversamente specificato, vanno considerate tutte le lunghezze d'onda contenute nella radiazione.

Le quantità utilizzate in radiometria sono [McCluney,1994]:

Flusso radiante (o potenza radiante)  $\Phi$  [W], Irradianza  $E$  [W/m<sup>2</sup>], Intensità radiante  $I$  [W/str], Radianza  $L$  [W/(str m<sup>2</sup>)].

È possibile ora vedere in dettaglio le quantità sopra menzionate:

Il **flusso radiante**  $\Phi$  o potenza radiante è l'energia radiante per secondo:

$$\Phi = dQ/dt \quad (1.1)$$

l'unità di misura utilizzata è il Watt. Questa grandezza descrive la quantità di energia trasferita per unità di tempo attraverso una superficie o una certa regione dello spazio. Al posto del flusso radiante (in Watt, ossia Joule/s) si utilizza anche il flusso di fotoni. Dal momento che  $E=hc/\lambda$ , la relazione di conversione fra il flusso radiante  $\Phi$  e il flusso di fotoni  $\Phi_p$  ad una specifica lunghezza d'onda  $\lambda$  è dato da [Man.Oriel; Kostkowski,1997]:

$$\Phi_p = \Phi \cdot \lambda \times 5.034 \times 10^{15} \quad [\text{fotoni/s}] \quad (1.2)$$

dove  $\lambda$  è espressa in nm e  $\Phi$  in Watt.

L'**irradianza**  $E$  è la densità di superficie del flusso radiante, ossia il flusso radiante per unità di area di una specifica superficie che incide su un punto di tale superficie:

$$E = d\Phi/dA_0 = d^2Q/(dtdA_0) \quad (1.3)$$

dove  $dA_0$  è un elemento infinitesimo della superficie in questione. L'unità di misura S.I. è il  $W/m^2$ .

Spesso viene utilizzato il termine “exitance”, indicato con la lettera  $M$ , per indicare la radiazione emessa da una superficie ma la definizione rimane la stessa e nel contesto di questa tesi tale distinzione è superflua, verrà quindi utilizzato il termine “irradianza” sia per indicare la quantità di luce proveniente da una certa superficie che quella incidente su una certa superficie o assorbita da una certa superficie.

L'irradianza è in generale funzione della posizione considerata sulla superficie. Il suo valore dipende da come varia con la direzione il flusso radiante della sorgente e dalle dimensioni dell'angolo solido sotteso dalla sorgente su ogni punto della superficie. Nella definizione sono quindi incluse tutte le direzioni dell'angolo solido emisferico al di sopra o al di sotto del punto considerato sulla superficie, infatti il flusso radiante incidente può in generale provenire da qualsiasi punto dell'angolo solido; in Fig.1.2a si riporta un disegno della geometria utilizzata.

L'**intensità radiante  $I$**  è la densità per angolo solido del flusso radiante, ossia il il flusso radiante per unità di angolo solido incidente su un punto nello spazio e propagantisi lungo una direzione specifica.

$$I = d\Phi/d\omega = d^2Q/(d\omega dA) \quad (1.4)$$

dove  $d\Phi$  è l'elemento di flusso radiante incidente su un punto nell'elemento  $d\omega$  di angolo solido. L'unità di misura utilizzata è il  $W/str$ .

Questa quantità è fortemente dipendente dalla direzione, è perciò un concetto utile quando si ha a che fare con sorgenti puntiformi, ma è in generale inadeguata quando si parla di sorgenti estese.

Il termine intensità può far pensare ad una identificazione di questa quantità con l'intensità della radiazione elettromagnetica, utilizzato comunemente in ottica; in realtà, come vedremo in seguito, l'intensità della radiazione elettromagnetica è ciò che in radiometria viene chiamata irradianza.

La **radianza,  $L$**  è la densità per area e per angolo solido del flusso radiante, ossia il flusso radiante per unità di area proiettata e per unità di angolo solido che incide lungo una direzione specifica, da un punto specifico su una specifica superficie.

$$L = d^2\Phi/(d\omega dA) = d^3Q/(d\omega dA d\theta) = d^3Q/(d\omega dA_0 \cos \theta) \quad (1.5)$$

si hanno quindi anche le seguenti relazioni:

$$L = dE/d\omega = dI/dA \quad (1.6)$$

dove  $dA = dA_0 \cos \theta$  è l'area della proiezione dell'area infinitesima  $dA_0$ , contenente il punto dove viene definita la radianza, su un piano perpendicolare alla direzione di propagazione del raggio luminoso. L'unità di misura utilizzata è il  $W/(m^2 \text{str})$ . Per maggior chiarezza si riporta in Fig.1.2b un disegno schematico della geometria adottata per la definizione.

La radianza è funzione sia della posizione che della direzione. Il flusso radiante e l'irradianza possono essere derivati da questa quantità attraverso la sua integrazione su una superficie finita di area e/o su un definito angolo solido.

A tutte queste grandezze, se riferite ad un intervallo spettrale unitario, va aggiunto il termine *spettrale* e il simbolo rimane lo stesso con l'aggiunta di  $\lambda$  al pedice. Ossia, per esempio, l'**irradianza spettrale**  $E_\lambda$  è il flusso radiante per unità di area e per unità di lunghezza d'onda:

$$E_\lambda = dE/d\lambda = d^2\Phi/(dA_0 d\lambda) \quad (1.7)$$

le unità di misura divengono quindi  $W/(m^2 nm)$ . In realtà nel sistema SI l'unità di misura corretta sarebbe  $W/m^3$ , ma correntemente ci si riferisce all'unità di area ( $m^2$ ) e all'unità di lunghezza d'onda (nm); spesso sono utilizzati altri sottomultipli del metro per enfatizzare alcune proprietà della radiazione da studiare.

L'irradianza spettrale è la quantità che è stata misurata nel corso delle misure eseguite per questa tesi, in seguito verrà meglio specificato il collegamento che essa ha con l'elettromagnetismo e le leggi di invarianza che segue.

In realtà il legame fra l'irradianza  $E$  e l'irradianza spettrale  $E_\lambda$  è dato, per uno spettroradiometro con risoluzione di  $\Delta\lambda$ , da:

$$E = \int E_\lambda d\lambda \approx \sum_i E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i = \Delta\lambda \sum_i E_{\lambda_i} \quad (1.8)$$

dove l'ultima uguaglianza è giustificata dal fatto che il passo dello strumento utilizzato è di norma costante per tutte le lunghezze d'onda.

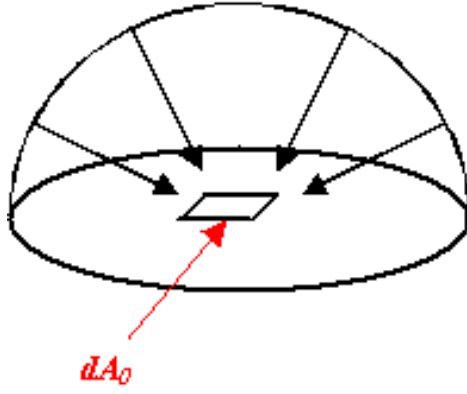


Fig. 1.2a: disegno schematico della geometria utilizzata per l'irradianza.

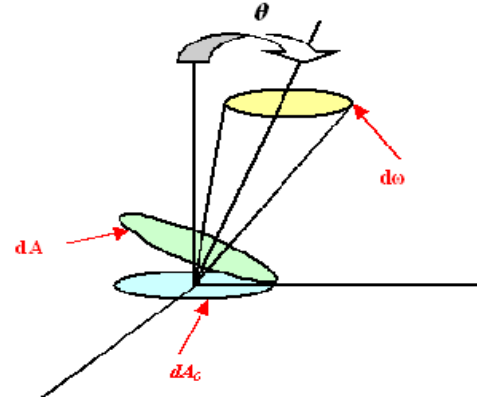


Fig. 1.2b: disegno schematico della geometria utilizzata per la radianza.

### 1.3 Irradianza spettrale

Come già accennato, in spettroradiometria la grandezza più utilizzata è di solito l'irradianza spettrale  $E_\lambda$ . In realtà quello che viene effettivamente misurato è l'irradianza spettrale media  $\overline{E}_\lambda$ :

$$\overline{E}_\lambda = \Delta\Phi / (\Delta A \Delta\lambda) \quad (1.9)$$

dove  $\Delta\lambda$  e  $\Delta A$  sono generalmente il passo dello spettroradiometro ( $\approx 1\text{nm}$ ) e l'area del ricevitore ( $\approx 1\text{cm}^2$ ). Al limite, per  $\Delta\lambda \rightarrow 0$  e  $\Delta A \rightarrow 0$ ,  $\overline{E}_\lambda$  tende all'irradianza spettrale  $E_\lambda$ :

$$E_\lambda = d^2\Phi / (dA d\lambda) \quad (1.10)$$

Di norma per  $\Delta\lambda$  di circa  $0.1\text{ nm}$  e  $\Delta A$  pari a  $1\text{ cm}^2$ , la differenza fra le due quantità è minore dell'1% [Kostkowski,1997].

L'irradianza è utilizzata come grandezza caratteristica di un certo tipo di assorbitore in ambito fotobiologico, come ad esempio la stima del “dose rate” o della “dose” di radiazione ultravioletta responsabile di danni biologici. Sarebbe forse più corretto definire la dose in termini di energia assorbita per unità di volume (come il *rad* usato per i campi di radiazioni ionizzanti), ma visto che nella regione ottica dello spettro, l'energia radiante è assorbita quasi completamente dalla superficie dell'oggetto irradiato (pelle, cornea, etc), risulta più conveniente esprimere la dose in termini di irradianza, ossia un'energia per unità di superficie [Gallo,1995].

Il “dose rate” efficace  $R$  si calcola dal prodotto di convoluzione tra lo spettro di efficacia biologica  $B(\lambda)$  e la radiazione disponibile  $E(\lambda)$  [NATO ASI series]:

$$R = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (1.11)$$

L'integrazione nel tempo di tale quantità prende il nome di dose D:

$$D = \int_0^{t'} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda)E(\lambda)d\lambda dt \quad (1.12)$$

la dipendenza spettrale degli spettri di efficacia biologica è molto importante, dal momento che anche l'irradianza nella regione UV varia fortemente con la lunghezza d'onda.

Nel caso di eritema della pelle, lo spettro di efficacia biologica è stato determinato esponendo dei soggetti a quantità controllate di radiazione monocromatica e misurando per ogni  $\lambda$  l'energia minima richiesta per indurre un effetto osservabile.

A tal fine viene assegnato un valore unitario alla lunghezza d'onda più dannosa, mentre alle altre componenti dello spettro UV viene assegnato un valore compreso fra zero e uno.

Un altro motivo per misurare l'irradianza spettrale, in questo caso solare, è quello di determinare la quantità di ozono stratosferico.

Mentre il 21% dei gas presenti nell'atmosfera è ossigeno molecolare ( $O_2$ ), solo tre parti su 10 milioni dei gas atmosferici è costituito da ozono. Di questo, circa il 10% si trova nella troposfera (da 0 m slm a 15 Km slm) mentre il 90 % si trova nella stratosfera (da 15 Km slm fino a 50 Km slm). Tale strato di ozono costituisce uno scudo protettivo contro la radiazione UV, assorbendo completamente la radiazione UVC e attenuando fortemente la radiazione UVB.

Pertanto, una riduzione dello strato di ozono produce un incremento di radiazione UV che raggiunge la superficie della terra.

Uno dei numerosi metodi per la stima dell'ozono presente nell'atmosfera si basa sul rapporto fra bande di assorbimento dell'ozono stesso da parte della stratosfera.

Conoscendo i coefficienti di assorbimento dell'ozono a due lunghezze d'onda diverse è possibile ricavare, tramite le misure di irradianza spettrale a queste due  $\lambda$  diverse, la quantità di ozono presente nella stratosfera.

Questo sarà visto con maggior dettaglio nei capitoli che seguiranno.

Vediamo ora le leggi di invarianza che rispetta l'irradianza.

### 1.3.1 Connessione con la teoria elettromagnetica

Generalmente nella teoria dell'elettromagnetismo, viene utilizzato il termine *intensità*  $I$  riferendosi al valore assoluto della media temporale del vettore di Poynting  $\vec{S}$ :

$$I = \left| \langle \vec{S} \rangle \right| = v \langle w \rangle \quad (1.13)$$

dove  $\langle \vec{S} \rangle = (c/8\pi) \Re(\vec{e} \wedge \vec{h}^*) = v \langle w \rangle \vec{s}$  è la media temporale del vettore di Poynting e  $v=c/n$  e  $w$  sono rispettivamente la velocità dell'onda nel mezzo, e la densità media di energia, elettrica più magnetica e  $\vec{s}$  è il vettore unitario diretto perpendicolarmente al fronte d'onda geometrico [Born,1959].

La quantità  $\langle \vec{S} \rangle$  ha le dimensioni di  $\text{W/m}^2$  e corrisponde a quella che in radiometria viene chiamata irradianza  $E$ .

### 1.3.2 Legge di Lambert e legge dell'inverso del quadrato della distanza

La relazione che si intende ricavare in questo paragrafo lega l'irradianza ricevuta su una certa superficie all'angolo di provenienza del fascio di radiazione.

Consideriamo dunque una superficie piana e un fascio isotropo di radiazione ottica. Dato un punto  $P$  sulla superficie  $S$ , la quantità di energia per unità di tempo  $\Phi$ , incidente su (o emergente da) una superficie  $\delta S$  in  $P$  entro un elemento di angolo solido  $\delta\omega$  attorno alla direzione specificata da gli angoli polari  $(\alpha, \beta)$ , può essere espressa nella forma  $\delta\Phi = B \cos \theta \cdot \delta S \cdot \delta\omega$ ; dove  $\theta$  è l'angolo che la direzione  $(\alpha, \beta)$  fa con la normale alla superficie direzione  $\delta S$  e  $B$  è un fattore che dipende in generale dalle coordinate del punto  $P$  sulla superficie e da  $(\alpha, \beta)$ . Il fattore  $\cos\theta$  è stato introdotto nella precedente relazione dal momento che la quantità fisicamente significativa è la proiezione di  $\delta S$  su un piano normale alla direzione  $(\alpha, \beta)$  piuttosto che  $\delta S$  stessa.

Se  $B$  può essere considerato costante sull'angolo solido ( $B$  indipendente dalla direzione, ossia si ha a che fare con radiazione isotropa) e la superficie  $\delta S$  è piana, allora si ha [Born,1959]:

$$E(\theta) = E_0 \cos \theta \quad (1.14)$$

dove  $E_0 = \int B d\omega$ . La relazione sopra trovata è chiamata *legge di Lambert* o *legge del coseno*, dal momento che mostra come l'irradianza vari con il coseno dell'angolo fra la sorgente e la normale alla superficie considerata.

Un diffusore lambertiano è una qualsiasi superficie che obbedisce alla legge del coseno di Lambert, ciò significa che l'irradianza incidente su un elemento di area della superficie del diffusore varia come il coseno dell'angolo fra la normale alla superficie e la direzione di incidenza. La radianza di un diffusore lambertiano è indipendente dalla direzione di incidenza.

Si parla quindi di *radiazione diffusa* o *emissione diffusa* quando la (1.14) è soddisfatta.

Per quanto riguarda la legge dell'inverso del quadrato della distanza, essa può essere ricavata partendo dalla legge di conservazione:

$$\text{div}(E\vec{s}) = 0 \quad (1.15)$$

dove  $E$  è l'irradianza (l'intensità della radiazione nel linguaggio classico dell'elettromagnetismo) e  $\vec{s}$  è il vettore unitario prima definito.

Integrando la (1.15) lungo un tubo di flusso luminoso, si trova che, date due superfici  $dA_1$  e  $dA_2$ , sezioni perpendicolari al tubo di flusso, la quantità  $E dA$  rimane costante ( $I dA$  in elettromagnetismo), quindi

$$E_1 dA_1 = E_2 dA_2 \quad (1.16)$$

dove  $E_1$  ed  $E_2$  sono rispettivamente le irradianze incidenti sulle superfici  $dA_1$  e  $dA_2$ . Questo risultato esprime la *legge per l'intensità dell'ottica geometrica* [M.Born,1959].

In particolare in un mezzo omogeneo i raggi luminosi possono essere approssimati da delle semirette e se in più il fronte d'onda è sferico, la (1.16) prende la forma:

$$E_2/E_1 = R_1^2/R_2^2 \quad (1.17)$$

dove  $R_1$  e  $R_2$  sono le distanze delle due superfici  $dA_1$  e  $dA_2$  dal centro di curvatura del fronte d'onda.

Osservando la (1.6) è possibile scrivere:

$$E = I d\omega/dA \quad (1.18)$$

dove  $d\omega$  è l'angolo solido sotteso da un pennello di luce proveniente da una sorgente puntiforme e  $dA$  è l'elemento di area su cui incide un flusso radiante  $d\Phi$ . Se  $R$  è la distanza della sorgente luminosa dalla superficie considerata, riscrivendo l'angolo

solido  $d\omega$  come  $d\omega = dA_0/R^2 = dA \cos\theta/R^2$ , dove  $\theta$  è l'angolo fra la normale alla superficie  $dA$  e la direzione di provenienza del raggio luminoso, si ottiene:

$$E = I \cos\theta / R^2 \quad (1.19)$$

questa espressione racchiude in se sia la legge del coseno di Lambert che la legge del quadrato della distanza.

Qualitativamente si può dire che la legge dell'inverso del quadrato della distanza rimane valida per distanze maggiori di circa dieci volte le dimensioni lineari della sorgente [P. Gallo, 1995].

La legge del coseno così come è stata espressa fino ad ora rimane valida fintanto che si può considerare la sorgente come puntiforme, per sorgenti estese bisogna considerare il contributo di ogni elemento di sorgente visto ad angoli diversi da ogni punto della superficie ricevente.

Nel corso di questa tesi sono state utilizzate solo sorgenti che per le loro dimensioni è stato possibile considerare come puntiformi.

#### **1.4 Sorgenti di radiazione misurate**

Le sorgenti di radiazione misurate durante questo lavoro di tesi sono quattro: il sole, una lampada calibrata alogena con filamento di tungsteno, una lampada al deuterio e una lampada al mercurio.

Tali sorgenti hanno avuto un ruolo specifico nella caratterizzazione dello spettroradiometro utilizzato e nella determinazione di importanti quantità di vario interesse, quali, le dosi di efficacia biologica, la stima della quantità di ozono colonnare presente nella stratosfera, la correzione di dati di irradianza solare calcolati dal satellite con i valori di albedo misurati direttamente sulla superficie terrestre, etc. L'albedo di una superficie è definito come il rapporto fra la radiazione diffusa dalla superficie stessa e la radiazione solare diffusa dal cielo. La radiazione solare diffusa dal cielo più la radiazione diretta del sole prende il nome di *radiazione globale orizzontale*.

L'albedo caratterizza dunque la quantità di radiazione elettromagnetica riflessa dal suolo e assume valori compresi fra 0 e 1.

Brevemente si può dire che il sole è servito per ricavare parametri di interesse ambientale protezionistico, oltre che a caratterizzare la risposta dello spettroradiometro utilizzato.



La lampada alogena è servita per calibrare la risposta dello spettroradiometro e come sorgente puntiforme per verificare le leggi di invarianza dell'irradianza spettrale.

La lampada al deuterio è stata utilizzata in maniera complementare alla lampada alogena per quanto riguarda la regione degli UVB-UVC.

La lampada al mercurio è servita principalmente per calibrare la risposta spettrale dello spettroradiometro.

Vedremo ora in dettaglio ognuna di queste sorgenti, con indicate le caratteristiche principali e l'utilizzo che ne è stato fatto.

#### **1.4.1 Il sole**

È una stella di massa pari a  $\approx 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$  e raggio di  $\approx 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ . La sua distanza dalla terra è di  $\approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ , pertanto è vista dalla superficie terrestre sotto un angolo di  $\approx 0.01 \text{ rad}$ ; il flusso radiante emesso è pari a  $\Phi = 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$  [Priest, 1943]

La sua irradianza spettrale misurata al di fuori dell'atmosfera terrestre, può essere assimilata allo spettro di emissione di un corpo nero alla temperatura di circa 6000 K. Nella Fig.1.4 è presentato, a titolo di esempio, il confronto fra la curva di un corpo nero alla temperatura di 6000 K, l'irradianza spettrale solare extraterrestre e le irradianze spettrali solari a terra in due diverse configurazioni di misura.

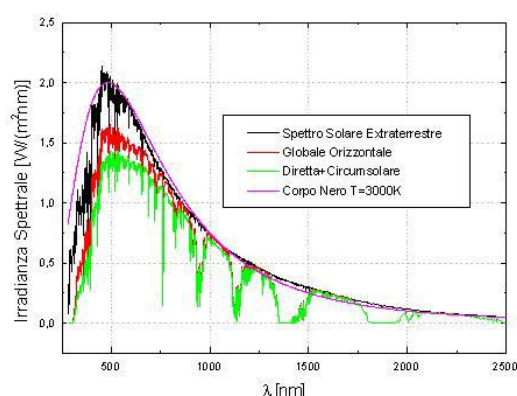
La curva del corpo nero è stata calcolata secondo la formula di Plank (da notare che questa formula restituisce i valori di irradianza spettrale per micrometro):

$$E_{\lambda} [W / (m^2 \mu m)] = 3.741 \times 10^8 / \{ \lambda^5 [\exp(14388 / (\lambda T)) - 1] \} \quad (1.20)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda ed è espressa in  $\mu m$  e T è la temperatura espressa in Kelvin.

Si nota che lo spettro di corpo nero si discosta visibilmente dallo spettro solare in quanto quest'ultimo è caratterizzato dalla presenza di diverse righe.

Questo perché il sole è circondato da un'estesa regione gassosa più fredda rispetto ai suoi strati interni e gli atomi e le molecole presenti nella zona fredda, riassorbono in determinate regioni spettrali la radiazione di corpo nero emessa dalle zone più calde e interne del sole.



**Fig.1.4:**Spettri solari extraterrestre, sulla superficie terrestre e spettro di corpo nero alla temperatura di 6000K.

Le righe di assorbimento corrispondenti a suddetto processo prendono il nome di *righe di Fraunhofer* e possono essere utilizzate come controllo del corretto funzionamento dello spettroradiometro.

Conoscendo infatti le esatte posizioni delle righe di Fraunhofer è possibile stabilire se lo spettroradiometro associa ad ogni componente dello spettro elettromagnetico il giusto valore in lunghezza d'onda.

Nella tabella che segue (Tabella 1.1) si riportano le posizioni in nm delle principali righe di Fraunhofer.

**Tabella1.1:**righe di assorbimento di Fraunhofer

Tipo di assorbimento	Ca	Fe	H	Fe	Na	H	O	O
λ [nm]	327	431	486	527	589	656	687	761

Proseguendo attraverso l'atmosfera terrestre, la radiazione solare subisce altre alterazioni, risultato dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica da parte dei vari gas che costituiscono l'atmosfera. I più evidenti sono gli assorbimenti dovuti a vapore acqueo e a CO<sub>2</sub>.

Un terzo circa della radiazione extraterrestre (soprattutto UVC e UVB) viene assorbita dall'atmosfera in particolare dall'ozono stratosferico e quindi l'irradianza spettrale misurata a terra dipende fortemente dallo spessore dell'ozono e da altri parametri.

Fra i principali fattori che influenzano la quantità di radiazione ottica che raggiunge la superficie terrestre, si trovano, oltre alla presenza di ozono, la diffusione di Rayleigh, la presenza di aerosol, la presenza di nuvole, l'altitudine e la posizione del sole nella volta celeste.

La grande dipendenza che intercorre fra la quantità di ozono presente nella stratosfera e la quantità di radiazione UV che raggiunge il suolo è già stata accennata e sarà più dettagliatamente trattata in seguito.

La diffusione di Rayleigh, dovuta allo scattering elastico delle onde sulle molecole dell'atmosfera, essendo un processo la cui probabilità è proporzionale all'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda ed è particolarmente importante per quanto riguarda la zona UV-blu dello spettro elettromagnetico. È infatti anche la causa dell'azzurro del cielo. L'attenuazione prodotta è più importante nella regione UVA, mentre nella regione UVB-UVC l'attenuazione maggiore è dovuta all'ozono [env.UV Radiation].

Con la parola aerosol, si intende l'insieme di piccole particelle colloidali sospese nell'aria insieme ad altre particelle tipo polveri e pollini. L'effetto di attenuazione è dovuto alla *diffusione di Mie*, è quasi costante nella regione UV dello spettro e non riveste un ruolo fondamentale nell'attenuazione dei raggi ultravioletti, soprattutto per quanto riguarda zone non molto inquinate [Kylling,2000].

La copertura nuvolosa del cielo influisce notevolmente sulla quantità di radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre; se la copertura nuvolosa è completa e in particolare se sono presenti precipitazioni, la quantità di radiazione UV (ma anche visibile) disponibile a terra è fortemente diminuita rispetto ad una giornata di cielo sereno. Se invece, la copertura del cielo è parziale, si può invece addirittura avere un 25% in più di radiazione UV incidente sulla superficie terrestre rispetto alla condizione di cielo limpido. Anche questo effetto è provocato dalla diffusione di Mie [Kondratyev,2000].

Durante questo lavoro di tesi le misure sono state tutte eseguite in condizioni di cielo sereno oppure in laboratori al chiuso.

Generalmente la quantità di UV che raggiunge la terra aumenta con l'aumentare dell'altitudine, ma in questo contesto tale parametro è influente, dal momento che tutte le misure sono state effettuate praticamente al livello del mare.

L'inclinazione del sole rispetto alla superficie terrestre è importante in quanto la radiazione attraversa strati diversi di atmosfera, subendo quindi diverse attenuazioni a seconda della posizione del sole nella volta celeste (SZA, solar zenith angle).

Nell'ambito del lavoro svolto la radiazione solare è stata utilizzata per la determinazione dell'albedo di varie superfici. Con tali valori di albedo, misurati quindi nell'intero range spettrale dello spettroradiometro utilizzato, sono stati corretti i dati di radiazione UV forniti dal satellite.

Un ulteriore studio che ha utilizzato il sole come sorgente è stato quello della dipendenza della radiazione solare incidente dalla posizione del sole nel cielo. Sono state eseguite delle acquisizioni nell'arco di una giornata senza nuvole ad intervalli di circa 15 minuti.

Le misure di radiazione solare a diverse lunghezze d'onda e a diversi SZA hanno permesso inoltre di ricavare con diversi algoritmi le misure di ozono colonnare.

#### ***1.4.2 Lampada alogena***

La misura accurata di radiazione ottica coinvolge non solo l'uso di uno spettroradiometro (o alternativamente di un radiometro o di un fotometro) ben caratterizzato, ma anche l'uso di uno standard per calibrare lo spettroradiometro stesso. Questo standard può essere nella forma di una sorgente radiante il cui spettro e le cui caratteristiche geometriche sono conosciute accuratamente o nella forma di un rivelatore la cui risposta è conosciuta accuratamente.

Nel nostro caso è stato necessario utilizzare una sorgente standard di irradianza spettrale.

Il tipo di sorgente utilizzata per calibrare uno strumento deve avere caratteristiche simili a quelle della sorgente sconosciuta che deve essere misurata.

Ad esempio non si può pensare di utilizzare una lampada da 1000 W per calibrare uno strumento che deve misurare la fluorescenza di livelli di luce dieci ordini di grandezza inferiori ed aspettarsi un risultato significativo. Esempi analoghi si possono fare per sorgenti di irradianza e radianza spettrale [optotronic lab.].

Nel presente lavoro è stato necessario misurare l'irradianza spettrale del sole, di una sorgente quindi incoerente, depolarizzata e con uno spettro di emissione simile a quello di un corpo nero, per ricavare gli importanti parametri menzionati nei paragrafi precedenti.

La sorgente di irradianza spettrale adeguata è una lampada calibrata QTH (Quartz Tungsten Halogen) a 200 W, certificata dal NIST (National Institute of Standards and Technology, USA), ente di riferimento per quanto riguarda la standardizzazione e l'unificazione delle quantità utilizzate in radiometria. Tale lampada è stata resa disponibile presso la sezione di Biofisica del C.N.R. di Pisa, dove si trovavano anche le strutture adeguate per riprodurre il più accuratamente possibile le condizioni sperimentali di calibrazione richieste.

La calibrazione della lampada stessa è resa possibile dal confronto della radiazione di un corpo nero con quella emessa dalla lampada utilizzando degli specifici standards di misura messi a punto dal NIST [Tsai,1997].

Questa sorgente emette fra 250 nm e 2400 nm e il suo spettro di emissione è simile a quello di un corpo nero a temperatura di circa 3000K, con una prevalenza di emissione nella regione del visibile e dell'infrarosso.

È una lampada con un piccolo filamento di tungsteno contenuto in un involucro in quarzo.

L'intensità della radiazione varia leggermente su grandi angoli solidi normali all'asse della lampada. Le dimensioni ridotte del filamento e dell'involucro permettono a questo tipo di sorgente di essere considerata puntiforme a distanze superiori o uguali a 50 cm.

Il filamento di tungsteno interno, di dimensioni lineari di circa 1cm, viene riscaldato a corrente costante fino a temperature di circa 3000 K emettendo la radiazione da misurare. L'involucro in quarzo è riempito di un gas alogeno che limita la tensione di vapore del filamento e permette al filamento di raggiungere temperature più elevate rispetto alle lampade a vuoto; serve anche per poter effettuare il cosiddetto *ciclo alogeno* [McCluney,1994;Gallo,1995]: il gas alogeno si combina con i vapori di tungsteno del filamento formando un alogenuro di tungsteno volatile che ricade sul filamento caldo decomponendosi. Il filamento riceve quindi delle quantità di tungsteno che lo rigenerano e il gas alogeno riformato inizia un nuovo ciclo. Questo ciclo consente una maggior durata della lampada.

La lampada utilizzata è della Oriel modello 63355 e numero di serie 7~1574 ed è stata fornita accompagnata dai dati di calibrazione, consistenti in una lista di valori di irradianza spettrale a diverse lunghezze d'onda ad una specifica distanza fra il ricevitore e la sorgente (50 cm) ed ad una precisa corrente di alimentazione (6.5A).

Naturalmente la lista di valori tabulati non è infinita e quindi è necessario ricavare in altra maniera i valori di irradianza spettrale per ogni altra lunghezza d'onda che non è presente nella lista. A tal fine il NIST fornisce insieme al report di calibrazione della lampada anche un'equazione di fit per calcolare l'irradianza spettrale per ogni lunghezza d'onda necessaria. L'equazione di fit è data da.

$$E_{\lambda} [mW/(m^2nm)] = \lambda^{-5} \cdot \exp(A + B/\lambda) \cdot (C + D/\lambda + E/\lambda^2 + F/\lambda^3 + G/\lambda^4 + H/\lambda^5) \quad (1.20)$$

dove gli otto coefficienti sono forniti direttamente dal NIST. Oltre ai valori di irradianza spettrale, vengono anche forniti gli errori ad essi associati nei diversi intervalli spettrali (vedi tabella 1.2).

**Tabella 1.2:** Errori associati alla calibrazione della lampada QTH

Lunghezza d'onda, $\lambda$ [nm]	250	350	654.5	900	1300	1600	2000	2400
Errore %	2.7	1.85	1.75	1.85	1.88	2.45	3.07	4.87

Gli errori associati all'uso della formula di fit sono maggiorati da un'incertezza aggiuntiva di circa lo 0.5% [Kostkowski,1997].

Il NIST provvede, oltre che all'interpolazione delle irradianze spettrali misurate (i valori discreti), anche allo studio delle incertezze associate [Gardner,2004].

### **1.4.3 Lampada al mercurio**

È la lampada più comunemente utilizzata come sorgente di righe spettrali conosciute. La lampada è stata messa a disposizione dalla Flyby s.r.l. ed ha le dimensioni di circa  $1cm \times 5cm \times 7cm$ .

Anche questa lampada fa parte della categoria delle sorgenti a bassa pressione e bassa densità ed è costituita generalmente da un involucro riempito con il gas, dove grazie alla presenza di due elettrodi, avviene la scarica. La luce emessa è caratteristica del gas di cui è riempita, infatti a seconda del gas si avranno diverse righe di emissione. È caratterizzata da un basso consumo e da una bassa temperatura dell'involucro esterno quando è accesa [Kostkowski,1997]. Questo permette alla lampada di essere posizionata molto vicino allo spettrometro o ai suoi componenti.

Come già accennato questo tipo di lampada viene usata come sorgente standard di lunghezze d'onda; lo spettroradiometro deve essere calibrato anche in lunghezza d'onda, ossia deve associare ad ogni componente spettrale misurata il giusto valore in lunghezza d'onda.

Questo tipo di calibrazione è la prima cosa da eseguire ed è molto importante che sia svolta accuratamente, soprattutto nella regione UVB-UVC dello spettro solare, dove le brusche variazioni di irradianza spettrale sono fortemente dipendenti dalla lunghezza d'onda.

Al concetto di calibrazione è stato comunque dedicato un capitolo a parte.

Per quanto riguarda la scelta dell'utilizzo di tale lampada come sorgente per la calibrazione spettrale è stato tenuto conto di cinque diversi fattori [Kostkowski,1997].

Il primo fattore da considerare è l'incertezza con cui è conosciuta una riga, tale incertezza deve essere minore della risoluzione dello strumento e per quanto riguarda le quelle del mercurio è possibile affermare che esse sono conosciute con un'accuratezza superiore a 0.01nm, che è ampiamente maggiore della risoluzione nominale dello spettroradiometro (0.5nm).

Il secondo fattore è la larghezza della riga stessa. Le righe del mercurio sono larghe qualche decimo di nm che è sempre minore della risoluzione.

L'irradianza delle righe spettrali deve essere abbastanza evidente rispetto al continuo. Anche tale parametro è soddisfatto per quanto riguarda la lampada al mercurio e il nostro strumento.

Gli ultimi due fattori da considerare sono il numero delle righe presenti e la loro distribuzione spettrale.

Anche questi ultimi due parametri sono soddisfatti dal momento che le righe della lampada a mercurio utilizzata sono ben visibili, distribuite in maniera quasi uniforme su tutta la banda passante dello strumento e in numero sufficiente per i tipi di analisi svolte.

## **2 APPARATO STRUMENTALE**

### **2.1 Cenni sulla catena strumentale**

Questo paragrafo è dedicato ad una discussione qualitativa degli strumenti e delle tecniche utilizzati in spettroradiometria per misurare svariate sorgenti di radiazione ottica.

È necessario a questo punto precisare la differenza fra un *radiometro* e uno *spettroradiometro*. Il primo è uno strumento di rivelazione di radiazione ottica che misura l'irradianza totale della sorgente analizzata. Non fornisce però informazioni spettrali della radiazione. È possibile con l'ausilio di filtri particolari, la cui curva di trasmissione abbia la stessa forma dello spettro di efficacia biologica desiderato, avere una stima diretta della dose e della dose efficace (vedi eq. (1.11) e (1.12)).

La caratterizzazione di tali strumenti è data dallo studio della risposta del rivelatore ad una sorgente standard e considerando le maggiori sorgenti di errore [Xu,2000].

Lo spettroradiometro invece è uno strumento in grado di rivelare lo spettro della radiazione (misurata in un certo intervallo spettrale).

Lo schema generale per un tale strumento è riportato in Fig.2.1.



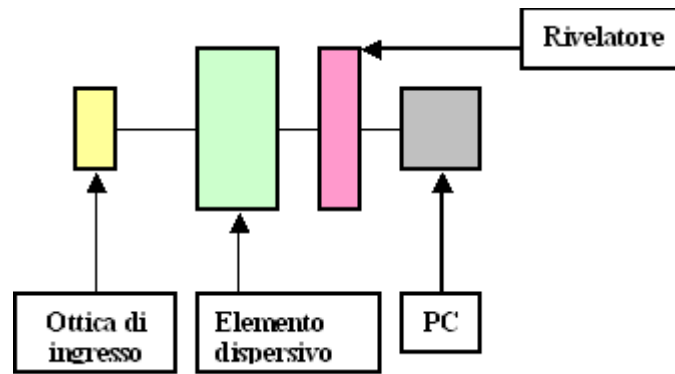


Fig.2.1:Schema generale di uno spettroradiometro.

Uno spettroradiometro è composto essenzialmente da tre blocchi: l'ottica di ingresso, l'elemento dispersivo e il rivelatore, oltre che l'elettronica necessaria e un PC per l'analisi dei dati.

L'ottica di ingresso consiste in filtri, lenti collimatrici, specchi e/o altri elementi in grado di correggere eventuali errori nella risposta dello strumento nonché fibre ottiche per consentire una maggior maneggevolezza nell'eseguire le misure.

Spesso sono quindi presenti in entrata alcuni elementi in grado di raccogliere la radiazione elettromagnetica in maniera "corretta". Come è stato accennato le quantità radiometriche sono fortemente dipendenti sia dalla direzione relativa fra sorgente e rivelatore che dalle loro dimensioni lineari. La risposta di uno strumento di misura può quindi risultare dipendente da tali fattori e deve quindi essere corretta. Questa correzione viene portata a termine con l'uso di *diffusori lambertiani* e *sfere integratrici*. Il loro compito è quello di ridurre la dipendenza della risposta di uno strumento dalla posizione e dalla direzione della sorgente [Kostkowski,1997].

Un diffusore consiste in un sottile strato di politetrafluoroetilene (Teflon) o quarzo smerigliato. La radiazione incidente da tutto l'angolo solido emisferico che incide su questa superficie viene trasmessa sull'altra superficie dello strato con alcune proprietà. Le caratteristiche del tipo di materiale e del metodo di fabbricazione possono far sì che la radiazione trasmessa abbia una radianza costante per ogni direzione dell'angolo solido emisferico. Tale diffusore, come già accennato, prende il nome di *diffusore Lambertiano*.

La sfera integratrice svolge un compito analogo. È costituita da una sfera metallica cava rivestita internamente da uno strato di una sostanza altamente riflettente. Sono presenti due piccole fenditure, poste generalmente a  $90^0$  l'una rispetto all'altra.

Attraverso una delle due aperture entra la radiazione ottica, la luce inizia quindi a riflettersi sulle pareti della sfera perdendo così ogni dipendenza angolare o direzionale. A questo punto la luce così diffusa passa attraverso la seconda fenditura ed entra nel secondo blocco dello schema, ossia l'elemento dispersivo. Naturalmente, se le due fenditure sono allineate, viene posto fra loro un piccolo schermo, per evitare in questo modo che la luce incida direttamente sulla fenditura di ingresso dello spettroradiometro.

A questo punto, la radiazione elettromagnetica proveniente dal diffusore o dalla sfera integratrice, viene raccolta o da una fibra ottica e poi, attraverso una piccola fenditura, diretta sull'elemento dispersivo, oppure viene inviata su quest'ultimo tramite specchi e/o lenti collimatrici.

Sostanzialmente l'elemento dispersivo serve per scomporre la radiazione ottica incidente sul diffusore nelle sue componenti spettrali che poi incideranno, così scomposte, sul rivelatore.

La posizione delle varie componenti spettrali sul rivelatore è data da alcune relazioni che legano la lunghezza d'onda della radiazione incidente con le caratteristiche dell'elemento dispersivo.

Tale dispositivo è di norma o un reticolo di diffrazione o un prisma.

La radiazione incidente sull'elemento dispersivo deve essere in generale collimata mediante l'uso di specchi e/o lenti, a meno che, come sarà in seguito precisato, l'elemento dispersivo non funga esso stesso anche da elemento collimatore.

Per la spettroradiometria nella regione UV dello spettro si utilizzano di norma reticoli di diffrazione e specchi collimatori, dal momento che sia i prismi che le lenti potrebbero dare dei problemi di assorbimento della radiazione.

Nei paragrafi successivi si vedrà in dettaglio le proprietà salienti dei reticoli in generale ed in particolare di quello utilizzato.

Per quanto riguarda l'ultimo blocco della catena strumentale è necessario a questo punto puntualizzare la differenza che intercorre fra *spettrografi* e *monocromatori*. Essa risiede infatti nel tipo di rivelazione utilizzato [Demtröder, 1981].

Gli spettrografi sono strumenti ottici che formano le immagini della fenditura di ingresso su un piano detto piano focale. Su tale piano è posto il rivelatore e le immagini formate sono separate lateralmente a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Lo spettro viene acquisito simultaneamente per ogni lunghezza d'onda misurata.

Il rivelatore può essere sia una lastra fotografica che un sensore multicanale (tipo PDA e CCD come si vedrà in seguito).

È quindi misurato l'intero intervallo di lunghezze d'onda che, incidendo sull'elemento dispersivo, corrisponde alla variazione laterale sul piano focale, indotta dall'elemento dispersivo, pari alle dimensioni lineari del rivelatore.

I monocromatori invece utilizzano un unico rivelatore fotoelettrico posto sul piano focale corrispondente a quello della fenditura di ingresso.

Viene quindi misurata l'intensità della radiazione incidente, per ogni lunghezza d'onda di interesse, in un ristretto intervallo di lunghezze d'onda. Per studiare diverse regioni dello spettro elettromagnetico occorre che la fenditura di uscita venga spostata lungo il piano focale o che l'elemento dispersivo venga ruotato di volta in volta. Quindi, diversamente dallo spettrografo, regioni spettrali distinte sono rivelate in tempi diversi.

Ci si riferisce in generale ad uno *spettrometro* per indicare uno strumento capace di misurare la radiazione visibile in ogni sua componente spettrale [Demtröder,1981].

## **2.2 Reticolo di diffrazione**

Nel corso degli anni si sono sviluppate tecniche e materiali diversi al fine di migliorare le prestazioni dei reticoli di diffrazione. Basti pensare che il primo reticolo è stato inventato da Rittenhouse nel 1785 e la sua scoperta non venne considerata degna di interesse; da allora il primo a riscoprire il principio dei reticoli è stato Fraunhofer nel 1819 e da un modello costituito da una serie di spire avvolte attorno a due viti si è passati ad altri costruiti con tecniche ben più elaborate. Il modello originale di Fraunhofer, a causa della semplicità con cui viene costruito, è utilizzato ancora oggi, soprattutto per quanto riguarda le lunghezze d'onda più lunghe, tipo infrarosso[Born,1959].

In pratica il reticolo è un dispositivo ottico costituito da molte fenditure parallele in grado di scomporre la radiazione elettromagnetica presente in un certo intervallo spettrale nelle sue componenti spettrali.

La teoria alla base dei reticoli è la stessa che descrive l'andamento di un fascio di radiazione elettromagnetica diffratto da una serie di fenditure parallele.

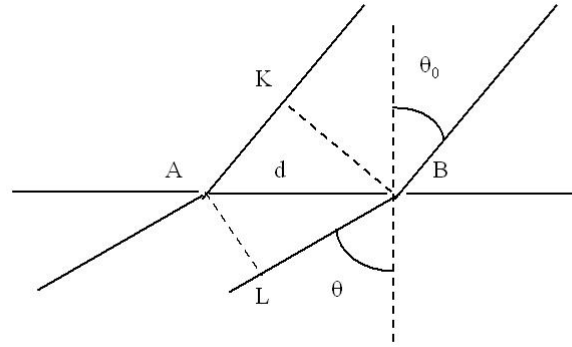
L'andamento dell'intensità della radiazione (quindi l'irradianza) in funzione dell'angolo di incidenza e della lunghezza d'onda della radiazione incidente è dato

dal prodotto della figura di interferenza dovuta a  $N$  fenditure equispaziate,  $H$ , con la funzione dell'intensità prodotta da una singola fenditura,  $I^{(0)}$ :

$$I = H \cdot I^{(0)} \quad (2.1)$$

Per ricavare queste due funzioni occorre considerare l'effetto di interferenza dato dalle  $N$  fenditure, quindi la differenza di cammino ottico fra le varie fenditure, e l'effetto della diffrazione di una singola fenditura.

Per semplicità si riporta nella Fig.2.2 lo schema generale per la determinazione della differenza di fase indotta da due fenditure adiacenti.



**Fig.2.2:** Schema per illustrare la teoria dei reticoli di diffrazione.

Con riferimento alla Fig.2.2,  $\theta_0$  e  $\theta$  sono gli angoli di incidenza e di diffrazione, A e B sono due fenditure adiacenti a distanza  $d$  l'una dall'altra, K e L sono i punti dove cadono le perpendicolari rispettivamente da B sul raggio incidente in A e da A sul raggio diffratto in B nella direzione  $\theta$ .

La dimensione delle fenditure è pari a  $s$ .

La differenza di cammino fra i due raggi incidenti su due fenditure adiacenti, vista in un punto distante di osservazione, è data da:

$$BL - AK = d(\sin \theta - \sin \theta_0) = dp \quad (2.2)$$

e la corrispondente differenza di fase è  $2\pi dp/\lambda = kdp$ .

Generalizzando al caso di  $N$  fenditure, dove la distanza fra due fenditure adiacenti è  $d$ , chiamato il *passo del reticolo*, ed il suo inverso indica il numero di righe (grooves) per millimetro (g/mm). Il profilo dell'intensità prodotta da tale reticolo è data da [M.Born,1959]:

$$I(p) = H(N, kdp/2) \cdot I^{(0)}(p) \quad (2.3)$$

dove:

$$H(N, kdp/2) = N^2 [\sin(Nkdp/2) / [N \sin(kdp/2)]] \quad (2.4)$$

$$I^{(0)}(p) = [\sin(ksp/2) / (ks p/2)] \quad (2.5).$$

Se  $s \ll d$ , la funzione  $I^{(0)}(p)$ , oltre al massimo in  $p=0$ , detto massimo principale, ha anche una serie di massimi ben definiti ma con ampiezza decrescente. Questi prendono il nome di massimi principali di ordine  $n$ .

La posizione di tali massimi è data dalla relazione:

$$dp = d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.6)$$

i massimi principali di ordine  $n$  sono separati da dei minimi le cui posizioni sono determinate da:

$$dp = d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = m\lambda / N \quad N \neq m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.7)$$

dove il segno “+” indica che gli angoli  $\theta_0$  e  $\theta$  sono posti dallo stesso lato della normale al reticolo, quindi nel caso del disegno di Fig.2.2 è necessario utilizzare il segno “-”.

I massimi principali sono separati da una serie di massimi secondari, la cui intensità varia secondo la legge:  $I_p/I_s = N^2$ , dove  $I_p$  e  $I_s$  sono rispettivamente l'intensità del massimo principale e quella del massimo secondario.

I parametri fisici più importanti che caratterizzano un dispositivo spettrale disperdente sono la dispersione angolare  $d\theta/d\lambda$ , la dispersione lineare e il potere risolutivo  $\lambda/d\lambda$ .

Queste quantità possono essere ricavate, per  $\theta_0$  costante, differenziando la (2.6) e la (2.7) facendo opportune considerazioni geometriche, i risultati sono:

$$d\theta/d\lambda = n/(d \cdot \cos \theta) \quad (2.8)$$

$$dx/d\lambda = f \cdot d\theta/d\lambda \quad (2.9)$$

$$\lambda/d\lambda = n \cdot N \quad (2.10)$$

dove  $f$  è la lunghezza focale della lente o dell'elemento collimatore utilizzato.

La dispersione angolare indica il cambiamento dell'angolo di diffrazione  $\theta$  corrispondente ad un piccolo cambiamento della lunghezza d'onda  $d\lambda$ .

La dispersione lineare indica lo spostamento sul piano focale delle immagini della fenditura di entrata in funzione di un cambiamento della lunghezza d'onda incidente.

Questa quantità definisce quindi l'estensione lineare sul piano focale di un intervallo

spettrale, viene espressa in mm/nm. Il suo inverso è significativo, dal momento che indica quale intervallo di lunghezze d'onda è contenuto in ogni millimetro a quella determinata distanza dal reticolo.

Il termine potere risolutivo è utilizzato per descrivere la capacità dello strumento di distinguere due componenti adiacenti nello spettro, cioè, la minima  $d\lambda$  che il reticolo consente di apprezzare soddisfa la relazione (2.10). Quest'ultima quantità è stata ricavata considerando il criterio di Rayleigh che afferma che due righe adiacenti sono distinguibili se il massimo di una delle due righe coincide con il minimo dell'altra.

Per calcolare il potere risolutivo ideale dello spettrografo è necessario conoscere la lunghezza del reticolo o il numero totale di scanalature.

Per fare un esempio, se il numero totale di righe  $N$  è di 12000 (con un reticolo con una densità di 600g/mm e dimensioni lineari di circa 2cm) si trova che per  $\lambda$  pari a 200nm si trova  $d\lambda$  uguale a circa 0.02nm, mentre per  $\lambda$  pari a 850nm si trova un  $d\lambda$  di circa 0.1nm. Questo valore teorico del potere risolutivo in pratica non è mai raggiunto, a causa di diversi fattori fra cui le dimensioni del reticolo, le aberrazioni del sistema spettrografico, la risoluzione spaziale del rivelatore etc [manual jobin yvon].

Le imperfezioni dovute al processo di manifattura dei reticoli, in particolare per quanto riguarda l'equispaziatura delle scanalature, possono dare origine a fenomeni di interferenza costruttiva da parte del reticolo alle lunghezze d'onda sbagliate; tali massimi di intensità indesiderati prendono il nome di *fantasmi (ghosts)*.

Questo problema è assente in particolari tipi di reticoli, detti *reticoli ad interferenza*.

Facendo incidere due fasci di radiazione elettromagnetica coerente su uno strato di materiale fotosensibile, si formano delle frange di interferenza che formano delle immagini sullo strato. La distanza fra le frange della figura di interferenza è determinata solamente dall'angolo con cui si intersecano i due fasci e dalla loro lunghezza d'onda. Quindi, dal momento che le scanalature sono determinate dalla condizione di interferenza, un reticolo così costruito non è affetto da errori casuali e periodici dovuti all'uso di una macchina scanalatrice [Hutley,1982].

A volte questo tipo di reticolo è chiamato impropriamente *reticolo olografico*.

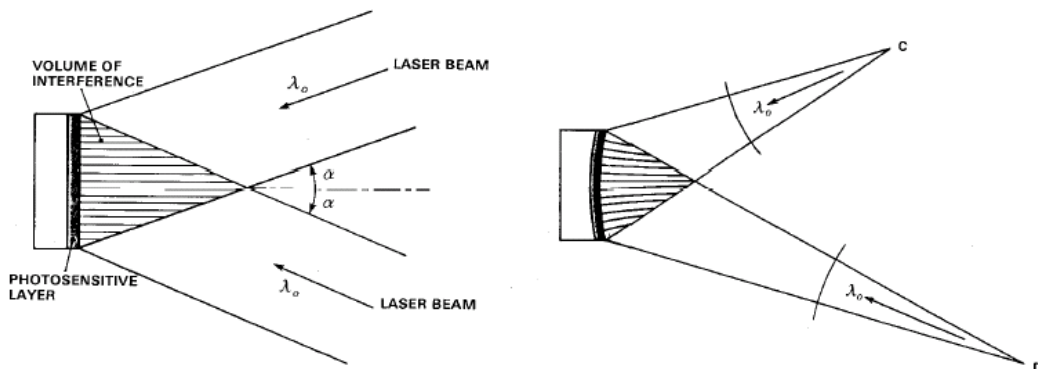
### 2.2.1 Reticolo olografico concavo

In realtà i reticoli olografici sono costruiti utilizzando una tecnica diversa che si basa appunto sull'olografia. Qualitativamente un ologramma “registra” informazioni sull'onda incidente in modo tale che queste informazioni possano essere ricostruite illuminando l'ologramma. Ciò è reso possibile registrando i disegni di interferenza fra l'onda originale e un'onda di riferimento.

Questo tipo di reticolo è costruito rivestendo il supporto con uno strato fotosensibile e successivamente esposto alle frange di interferenza di due raggi laser. Il trattamento chimico dello strato fotosensibile è tale da far sì che le aree illuminate si dissolvano, formando così le scanalature in rilievo. A questo punto viene vaporizzato sul reticolo un rivestimento di metallo e il reticolo è così pronto all'uso.

La geometria dei fronti d'onda dei fasci laser può essere variata in modo tale da creare una distribuzione non lineare delle scanalature; questa non linearità è utilizzata per produrre reticoli corretti dalle aberrazioni (vedi Fig.2.3). La forma delle scanalature dei reticoli olografici è di tipo sinusoidale [man.Jobin Yvon].

Questo tipo di reticoli è completamente privo di fantasmi [Demtröder,1981]



**Fig.2.3:** produzione di reticoli olografici, a sinistra un reticolo prodotto con scanalature equidistanti e parallele, a destra reticolo olografico concavo corretto per le aberrazioni, con le scanalature curve e distribuite in modo non lineare sulla superficie [tratto da man.jobin yvon].

Fino a questo momento sono stati presi in considerazione solo reticoli piani, su cui, per quanto visto precedentemente, il fascio incidente è necessario che sia un fascio parallelo.

Dal momento che la radiazione da misurare proviene, per quanto detto precedentemente, da una fenditura, è necessario che tale radiazione sia collimata.

È possibile fare a meno di lenti e specchi se è il reticolo stesso che funge da elemento collimatore.

Il reticolo impiegato nello spettroradiometro utilizzato è un reticolo a riflessione, olografico concavo. Le sue caratteristiche complessive saranno presentate nel paragrafo successivo.

Come accennato precedentemente, utilizzando un reticolo piano è necessario che la radiazione incidente dalla fenditura di ingresso sul reticolo sia collimata attraverso l'utilizzo di specchi o lenti; analogamente quando la luce è stata diffratta e separata nelle sue componenti spettrali deve essere messa a fuoco per poter essere rivelata. Anche questa operazione è di solito portata a termine grazie all'uso di elementi collimatori.

Nel 1882 H.A.Rowland mostrò che formando il reticolo su un substrato sferico concavo, invece che su un substrato piano, il reticolo stesso avrebbe potuto esso stesso assolvere al compito di elemento collimatore.

In questo modo, evitando l'inserimento di ulteriori elementi lungo il percorso fatto dalla radiazione all'interno dello spettroradiometro, si evita che venga perduta una parte significativa della radiazione elettromagnetica incidente. I reticoli olografici concavi hanno, rispetto ai reticoli scanalati, alcuni vantaggi per quanto riguarda le aberrazioni, la quantità di radiazione diffusa all'interno dello spettrometro e le caratteristiche di costruzione di reticoli con particolari caratteristiche (numero di grooves per mm, dimensioni del reticolo etc.) [Slutten,].

Per costruire tale tipo di reticolo Rowland utilizzò una macchina scanalatrice, utilizzata per incidere le scanalature su un reticolo piano, direttamente sul substrato sferico.

Il risultato è stato quello di ottenere un reticolo sferico concavo la cui spaziatura fra le scanalature non è costante sul reticolo ma lo è invece su una corda.

In particolare Rowland mostrò che se una sorgente è posta su un cerchio, tangente al centro del reticolo sferico ma di raggio pari alla metà del raggio di curvatura del reticolo, la sua immagine, in prima approssimazione, è formata anch'essa su questo cerchio.

Attraverso considerazioni trigonometriche, è possibile ricavare la condizione enunciata sopra [Hutley,1982].



Infatti, sia  $r$  la distanza della sorgente dal centro del reticolo,  $r_1$  la distanza fra l'immagine formata della sorgente dal centro del reticolo e  $R$  il raggio di curvatura del reticolo (quindi il cerchio di cui sopra ha raggio pari a  $R/2$ ),  $\theta_0$  l'angolo di incidenza e  $\theta$  l'angolo di diffrazione, si trova:

$$\cos \theta_0 / R - \cos^2 \theta_0 / r + \cos \theta / R - \cos^2 \theta / r_1 = 0 \quad (2.11)$$

questa equazione è nota come equazione focale per i reticoli concavi sferici.

Una soluzione della (2.11) è ottenuta se i termini in  $\theta$  e  $\theta_0$  si annullano separatamente, in tal caso:

$$\cos \theta_0 / R = \cos^2 \theta_0 / r \quad e \quad \cos \theta / R = \cos^2 \theta / r_1 \quad (2.12)$$

quindi si trova:

$$r = R \cdot \cos \theta_0 \quad e \quad r_1 = R \cdot \cos \theta \quad (2.13)$$

che sono proprio le condizioni per cui sia la sorgente che la sua immagine giacciono su un cerchio di diametro  $R$ .

Analogamente si trova la condizione sulla spaziatura delle scanalature. Infatti la radiazione incidente è messa a fuoco in un punto sul cerchio di Rowland se le proiezioni delle scanalature su una corda sono a passo costante e non se le scanalature stesse sul reticolo sono a passo costante [Hutley,1982].

Questa condizione è stata ricavata considerando la diffrazione da due scanalature adiacenti a distanza  $d$  l'una dall'altra e poste al centro del reticolo, e quella dovuta a due altre scanalature adiacenti, a distanza  $d'$  l'una dall'altra, poste a distanza angolare  $\alpha$  dalle precedenti. Si suppone per semplicità che la sorgente sia posta nel centro di curvatura del reticolo.

La radiazione proveniente dalla sorgente incide perpendicolarmente al reticolo (dal momento che è posta nel suo centro di curvatura) e viene diffratta rispettivamente ad angoli  $\theta$  e  $\theta'$ .

Sempre grazie a semplici passaggi di geometria trigonometrica si ricava:

$$\sin \theta / \sin \theta' = 1 / \cos \alpha \quad e \quad d' = d / \cos \alpha \quad (2.14)$$

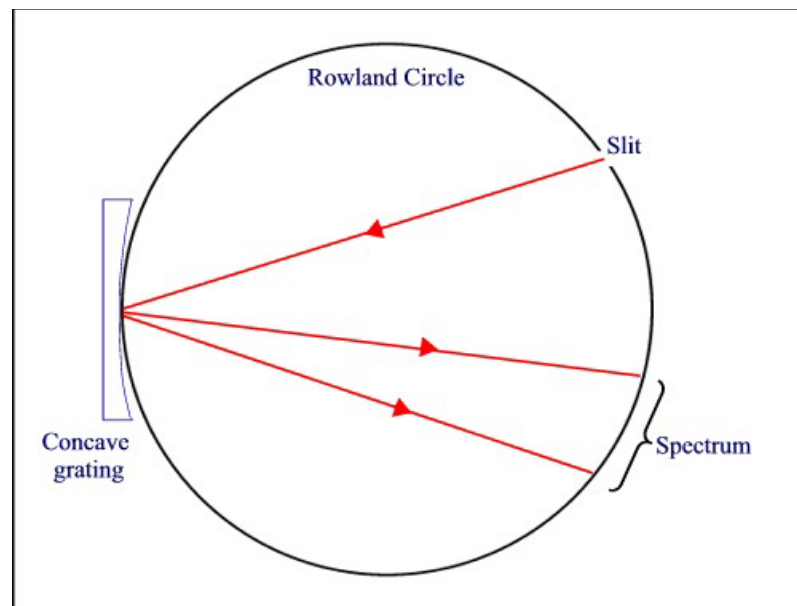
queste relazioni indicano che la condizione focale per il cerchio di Rowland è verificata quando le proiezioni delle scanalature del reticolo su una corda del cerchio sono costanti.

Tutte le relazioni trovate precedentemente per il reticolo sferico sono state ricavate nell'approssimazione di un reticolo con un'apertura non molto grande, ossia con  $\alpha$

piccolo, in modo tale che  $\Delta = \theta - \theta'$  sia piccolo e che si possa affermare che  $\cos \Delta = 1$  e  $\sin \Delta = \Delta$ .

Se queste approssimazioni non possono essere considerate vere, l'immagine della sorgente, diffratta dalle estremità del reticolo, non si forma sul cerchio di Rowland e si dice che l'immagine è soggetta ad aberrazioni sferiche.

Nella Fig.2.4 si riportano uno dei diversi modi per posizionare il reticolo concavo e il ricevitore in maniera tale da soddisfare l'equazione (2.11) e in particolare la condizione di Rowland (2.13).



**Fig.2.4:** schema generale per l'utilizzo dei reticoli concavi.

Ciascuna di queste configurazioni ha delle caratteristiche che la contraddistinguono dalle altre, in particolare è possibile con una certa configurazione correggere certi errori rispetto ad un'altra configurazione ma averne di nuovi; si tratta quindi di trovare un compromesso fra le varie esigenze per le misure da eseguire.

Una maniera per correggere le aberrazioni è quella di utilizzare un reticolo olografico. Mediante questa tecnica è possibile costruire il reticolo in modo che le sue scanalature siano adattate al tipo di errore da correggere.

Il reticolo utilizzato è un reticolo olografico concavo e nella tabella che segue (Tabella 2.1) sono riportate le sue caratteristiche importanti.

**Tabella2.1:** Caratteristiche del reticolo utilizzato

$d$	1.7 $\mu\text{m}$ (600g/mm)
$d\theta/d\lambda$ ( $\lambda=400\text{nm}$ )	$\sim 0.6 \cdot 10^{-3} \text{rad nm}^{-1}$
$\lambda/d\lambda$	$\sim 1.2 \cdot 10^4$
Lunghezza focale	$\sim 85\text{mm}$
$dx/d\lambda$ ( $\lambda=400\text{nm}$ )	$\sim 5.1 \cdot 10^{-2} \text{mm nm}^{-1}$
$d\lambda/dx$ ( $\lambda=400\text{nm}$ )	$\sim 19.6 \text{nm mm}^{-1}$

## 2.3 Rivelazione della radiazione

Questo è l'ultimo blocco della catena strumentale e riveste un ruolo fondamentale per la riuscita delle misure. Per molte applicazioni infatti, la rivelazione accurata della radiazione ottica e la misura precisa della sua intensità sono di vitale importanza;

In commercio esistono molti tipi di rivelatori, basati su differenti principi fisici. Alcuni danno una risposta in funzione del calore prodotto quando l'energia radiante è assorbita da una superficie, di questi alcuni convertono il calore in movimenti meccanici mentre altri lo convertono in una corrente elettrica. Altri utilizzano delle emulsioni fotografiche che convertono la radiazione incidente in cambiamenti chimici resi visibili dal processo di sviluppo. Altri ancora fanno uso delle proprietà dei semiconduttori o sfruttano l'effetto fotoelettrico

Per tutti i tipi di sensori le caratteristiche importanti da considerare sono le seguenti [Demtröder,1995; Kostkowski,1997 ]:

1) *risposta spettrale relativa*: determina l'intervallo spettrale in cui può essere utilizzato il rivelatore. Se il rivelatore fosse ideale, questa quantità dovrebbe essere uniforme su tutto l'intervallo spettrale.

2) *responsività  $R(\lambda)$* : è definita come il rapporto fra il segnale di uscita (che può consistere in Volt, Ampere, etc.) e il flusso di radiazione incidente:

$$\bar{R} = \Delta S / \Delta \Phi \quad [A/W] \quad (2.15)$$

dove  $\bar{R}$  è la responsività media,  $\Delta S$  è la variazione del segnale in uscita  $S$  corrispondente ad una variazione  $\Delta \Phi$  del flusso di radiazione incidente. In realtà, come mostrato nella (2.15), invece di utilizzare il formalismo delle derivate si ha a

che fare con le medie e intervalli piccoli e limitati (analogamente a quanto detto precedentemente per l'irradianza spettrale, vedi par.1.3) [Kostkowski,1997].

La responsività è in generale una funzione di più variabili; idealmente si dovrebbe avere una relazione lineare fra il segnale in uscita e la radiazione incidente, ma spesso il rivelatore mostra un comportamento non lineare a causa di parametri quali la temperatura, la lunghezza d'onda e l'intensità della radiazione incidente, la posizione del flusso incidente rispetto alla fenditura di ingresso dello spettrografo, la sua distribuzione spettrale la sua polarizzazione [Kostkowski,1997].

Questa funzione lega quindi il segnale di uscita, il flusso incidente e tutti gli altri parametri che influiscono sul corretto funzionamento del rivelatore [McCluney,1994].

È un compito arduo riuscire a determinare questa funzione e individuare tutti gli elementi che influiscono.

Dalla relazione che lega il segnale di uscita con il flusso incidente si ricava l'equazione di misura ma questo punto verrà affrontato in maggior dettaglio nei capitoli che seguono.

3) *NEP (Noise Equivalent Power)*: è definito come la quantità necessaria di flusso radiante in Watt in grado di dare un segnale in uscita pari al livello medio di rumore del rivelatore stesso.

In altre parole è il flusso di radiazione necessario per produrre un rapporto segnale/rumore uguale a 1.

È espresso in watt ed è definito come il rapporto fra la radice quadrata del rumore quadratico medio  $\sigma$  e la responsività  $R$ :

$$NEP = \sigma / R \quad [W] \quad (2.16)$$

questa quantità è molto importante perchè impone un limite inferiore alla quantità di radiazione che può essere rilevata.

A volte viene utilizzati l'ENI (equivalent noise input), ma la definizione è analoga a quella del NEP: indica la quantità di segnale in ingresso in grado di generare un segnale in uscita pari al rumore quadratico medio.

4) *detettività  $D$* : è l'inverso del NEP. Più grande è il suo valore più piccoli saranno i segnali a poter essere misurati.

5) *intervallo di linearità*: è l'intervallo in cui il segnale di uscita dello strumento rimane lineare in funzione del flusso incidente.

Generalmente si estende dal livello di NEP fino ad un certo valore limite di potenza incidente che può essere imposto sia dal rivelatore stesso che da impedenze di uscita di altri circuiti esterni eventualmente collegati allo strumento.

6) *tempo di risposta*  $\tau$ : è il tempo che impiega il segnale in uscita a salire quando è sottoposto ad una quantità di radiazione costante. Analogamente quando la sorgente viene rimossa si ha un tempo di discesa  $\tau_d$  che indica che il segnale in uscita diminuisce fino a 1/e del suo valore iniziale in un tempo  $\tau_d$ . In generale  $\tau$  e  $\tau_d$  sono diversi essendo influenzati da parametri diversi [Oriel Instr.].

7) *stabilità*: uno spettroradiometro stabile è uno strumento la cui responsività cambia insignificamente con il passare del tempo.

L'eventuale insabilità del rivelatore può essere dovuta sia a fattori interni al rivelatore stesso (responsività non stabile con l'uso o dipendente dalla storia dello strumento) o ambientali (principalmente variabilità con la temperatura) [Kostkowski,1997].

8) *sensibilità superficiale*: è la sensibilità della superficie utile del rivelatore, in teoria dovrebbe essere costante su tutta la superficie del sensore.

### **2.3.1 Tipi di rivelatori**

Come già accennato è possibile classificare i vari tipi di rivelatori in base al principio fisico di funzionamento. I tipi di sensori disponibili si possono raggruppare in quattro categorie: rivelatori termici, fotoemissivi, a semiconduttore e multicanale, quest'ultima classe è stata trattata nel paragrafo successivo. La prima classe di rivelatori ad essere trattata è quella dei *rivelatori termici*. Questo tipo di strumento dà un segnale di uscita proporzionale all'aumento di temperatura prodotto dall'assorbimento della radiazione elettromagnetica incidente sul sensore. Tale sensore è rivestito da uno strato altamente assorbente nell'intervallo spettrale di interesse e permette di ottenere una responsività quasi costante su tutto l'intervallo [McCluney,1994]. A causa dell'indipendenza di R dalla lunghezza d'onda, questo tipo di sensore è molto utile per le calibrazioni assolute [Demtröder,1995]. Questi strumenti sono caratterizzati da dei tempi di risposta piuttosto lunghi (~ms) in relazione al tempo di raggiungimento dell'equilibrio termico.

Il piranometro è un tipo speciale rivelatore termico, principalmente utilizzato per la misura della radiazione solare. Questi oggetti misurano la radiazione globale del sole

e hanno una risposta costante per l'intervallo spettrale che va da circa 350nm fino a 3.5 $\mu$ m [McCluney,1994].

I sensori di tipo volumetrico fanno uso di materiali le cui proprietà variano in funzione della temperatura. Alcuni materiali sono soggetti ad un cambiamento della resistenza in dipendenza ad una variazione della temperatura, altri cambiano la loro polarizzazione interna come ad esempio i sensori piroelettrici. In questo tipo di oggetti il materiale di cui sono costituiti ha una certa polarizzazione elettrica anche in assenza di una tensione applicata.

Una variazione della polarizzazione interna, causata da un cambiamento della temperatura, produce una variazione misurabile della carica superficiale misurabile. Questo tipo di sensore è utilizzato principalmente nella regione spettrale dell'infrarosso [Demtröder,1995].

I sensori a fotoemissione si basano invece sull'effetto fotoelettrico, per cui, per ogni fotone incidente su un metallo con energia sufficiente, vengono liberati degli elettroni, detti fotoelettroni.

Fra i vari tipi di sensori a fotoemissione si trova il fotomoltiplicatore (PMT, PhotoMultiplierTube). La minima lunghezza d'onda a poter essere rilevata è determinata dal materiale che costituisce l'involucro, mentre la massima lunghezza d'onda misurabile è limitata dal materiale che costituisce il catodo [Kostkowski,1997].

L'ultima classe di sensori ad essere trattata è quella dei sensori a semiconduttore. Sono dispositivi a stato solido e sono costituiti da una giunzione p-n di un materiale semiconduttore, generalmente silicio, fissata su una finestra su cui incide la radiazione.

Ai capi della giunzione, senza alimentazione esterna, si crea una differenza di potenziale che, quando è illuminata dalla radiazione con energia maggiore dell'energy gap  $\Delta E_g$  (differenza fra l'energia della banda di conduzione e quella della banda di valenza), aumenta in proporzione al flusso radiante incidente.

L'intervallo spettrale che tali strumenti possono rilevare è limitato inferiormente dalle caratteristiche del materiale di cui è composto e dal materiale di cui è composta la finestra di ingresso della radiazione. Il limite superiore è determinato dalla differenza di energia fra la banda di conduzione e la banda di valenza, che nel caso del silicio è pari a 1.12eV, si aggira intorno ai 1100nm [Kostkowski,1997].

I tempi di risposta sono dati in termini del tempo di salita, cioè il tempo necessario al segnale in uscita per andare dal 10% al 90% del suo valore finale.

### **2.3.2 Rivelatori multicanale**

Fino a questo punto è stato accennato solo a tipi di sensori singoli, cioè sensori che hanno in uscita solo un singolo segnale.

I rivelatori multicanale sono dei dispositivi costituiti da un grande numero di sensori paralleli che possono essere utilizzati simultaneamente e indipendentemente.

In spettroradiometria vengono utilizzati principalmente negli spettrografi, dal momento che sono in grado di rilevare la radiazione anche in un ampio intervallo di lunghezze d'onda.

Uno dei vantaggi che ne viene dall'uso di un rivelatore multicanale è ad esempio che per misure che richiedono un tempo di esposizione piuttosto lungo (segnali deboli), la misura simultanea di diverse lunghezze d'onda consente un notevole risparmio di tempo. Se infatti volessimo misurare, con un sensore singolo, un certo intervallo spettrale di una sorgente debole, utilizzando quindi un tempo di esposizione piuttosto lungo, il tempo totale della misura potrebbe richiedere anche delle ore.

Durante questo periodo di tempo le condizioni ambientali, la sorgente o il rivelatore stesso potrebbero essere soggetti a dei notevoli cambiamenti rendendo le misure a lunghezze d'onda diverse non confrontabili fra loro.

I rivelatori multicanale sono utili anche per la misura di sorgenti a vita breve, tipo esplosioni o lampadine a flash (flash bulbs), dove per misurare un intero intervallo spettrale con l'uso di un detettore a singolo canale è necessario utilizzare una nuova sorgente per ogni lunghezza d'onda di interesse.

I detettori multicanale trovano utilità anche nella spettroradiometria solare, dove grazie alla misura contemporanea di tutto un intervallo spettrale è possibile acquisire lo spettro solare nelle stesse condizioni ambientali. Ad esempio, la variabilità, a volte anche nell'arco di pochi minuti, della copertura nuvolosa del cielo può far sì che, utilizzando un sensore singolo, misure a lunghezze d'onda differenti siano state eseguite in condizioni atmosferiche diverse [Kostkowski,1997].

Il primo tipo di sensore ad essere trattato è il PDA (PhotoDiode Array); questo è costituito da un numero elevato (qualche migliaia) di fotodiodi integrati su un unico chip. Se i fotodiodi sono posizionati lungo una linea si ha un PDA unidimensionale,

mentre se sono posizionati in una matrice si ha un PDA bidimensionale, in grado di misurare anche distribuzioni superficiali di radiazione elettromagnetica. Generalmente i PDA operano in modo di scarica capacitiva, dove i fotodiodi stessi hanno la funzione sia di condensatore che di sensore di radiazione. Una tensione esterna (generalmente di 5 volts) carica la capacità interna dei fotodiodi, che vengono successivamente isolati ed esposti alla radiazione da misurare per un certo periodo di tempo, detto *tempo di integrazione*. La corrente  $I$  generata da ciascuno di essi, con superficie sensibile  $A$  e guadagno quantico  $\eta$ , per un'irradianza incidente  $E$ , è pari a  $I = \eta AE$ . Questa corrente, sovrapposta alla corrente di buio del fotodiodo, scarica il fotodiodo fino a che non finisce il tempo di integrazione. A questo punto i fotodiodi vengono ricaricati e viene quindi misurata la carica necessaria per completare questa operazione.

La carica misurata per ogni fotodiodo è il segnale di uscita e viene in seguito digitalizzato ed eventualmente visualizzato sul computer.

A causa del rumore termico, e quindi la corrente di buio, i PDA devono essere raffreddati, altrimenti la scarica del condensatore sarebbe troppo veloce, impossibilitando la scelta di tempi di integrazione più lunghi per sorgenti più deboli.

Un altro tipo di sensore multicanale, ma con un minor rumore termico, è il sensore CCD (Charge Coupled Device). Essi sono assemblati su un unico chip di silicio di tipo p con una superficie sensibile fino a  $5\text{cm}^2$ . Drogando il silicio con degli ioni opportuni, si creano delle colonne di tipo n, i canali, in cui vengono raccolti gli elettroni; questi pozzi di potenziale o zone di raccolta prendono il nome di *pixel* (picture-element) e le loro dimensioni lineari variano da  $7.5\mu\text{m}$  a  $27\mu\text{m}$ . La raccolta di elettroni in questi canali dura per un certo tempo, detto *tempo di integrazione*, che varia a seconda dell'intensità della radiazione incidente.

Le zone di potenziale e gli elettroni che eventualmente contengono, possono essere spostati lungo i canali applicando una certa tensione. Quando giungono all'ultimo canale uno shift register invia i pacchetti di elettroni che arrivano ad un amplificatore e ad un dispositivo che ne misura la carica.

Possono essere utilizzati nell'intervallo spettrale che va da  $0.1\text{nm}$  fino a  $1100\text{nm}$ , ma le tecniche di produzione di sensori per la rivelazione della radiazione con lunghezza d'onda inferiore a  $180\text{nm}$  sono molto difficili e costose.

Il NEP e il rapporto segnale rumore sono di gran lunga migliori rispetto a quelli di un PDA a causa del maggior rumore termico di quest'ultimo.



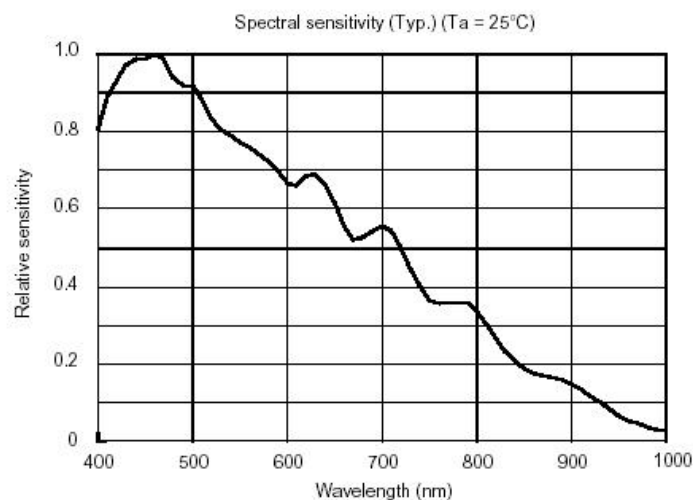
In generale quindi i rivelatori multicanale hanno un certo numero di pixel a cui, per ottenere il valore di irradianza spettrale misurata, deve essere associato il valore della lunghezza d'onda. Si avrà quindi una certa relazione non lineare fra il numero di pixel e il valore in lunghezza d'onda; lo stabilire questa relazione è quello che viene chiamato *calibrazione spettrale* dello spettroradiometro. Ad ogni pixel, o più precisamente ad ogni gruppo di pixel, corrisponde una certa lunghezza d'onda specifica.

## 2.4 Lo spettroradiometro

Si riassumono in questo paragrafo le caratteristiche principali dello spettroradiometro utilizzato. Per quanto riguarda l'ottica di ingresso, sono presenti un diffusore lambertiano in teflon compresso dal diametro di 0.8mm e una fibra ottica dal nucleo di 400 $\mu$ m lunga circa 2m specifica per radiazione UV-VIS in materiale anti solarizzazione. La fenditura di ingresso è larga 25 $\mu$ m mentre l'elemento dispersivo è un reticolo olografico concavo compensato per le aberrazioni sferiche. Il numero di scanalature è di 600g/mm e la sua lunghezza focale  $L_f$  è di circa 85mm.

Il rivelatore utilizzato è un sensore CCD a 2048 pixel dalle dimensioni di 14 $\mu$ m per 200  $\mu$ m ciascuno.

Nella Fig.2.5 si riporta a titolo di esempio la curva di sensibilità relativa del sensore CCD.



**Fig.2.5:** Curva della responsività quantica relativa del sensore CCD utilizzato [manuale SONY].

A questo punto è possibile dare la definizione di apertura numerica, NA. Questa grandezza caratterizza la capacità dello spettrografo di raccogliere la radiazione elettromagnetica proveniente dalla fibra ottica e incidente sulla fenditura di ingresso ed è definita come:

$$NA = \mu \sin \Omega \quad (2.17)$$

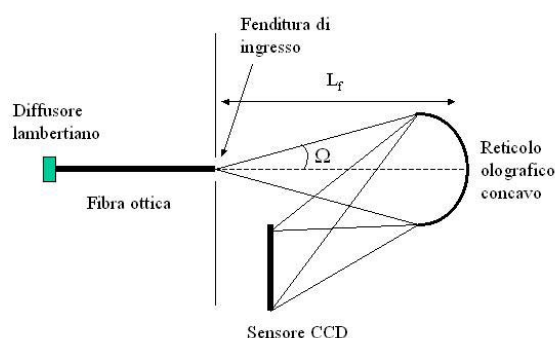
Dove  $\mu$  è l'indice di rifrazione del mezzo (in aria  $\mu=1$ ) e  $\Omega$  è il semiangolo fra la normale al reticolo e la linea che congiunge la fenditura di ingresso con una delle estremità del reticolo. Questo angolo può essere ricavato conoscendo la lunghezza del reticolo e il suo raggio di curvatura.

Spesso al posto di NA si utilizza la metà del suo inverso  $1/(2NA)$  che prende il nome di F/value. Per valori piccoli della F/value viene raccolta una quantità maggiore di luce ma si incrementa l'effetto delle aberrazioni; infatti si ha che il flusso radiante  $\Phi$  aumenta come l'inverso del quadrato dell'F/value,  $\Phi \propto 1/(F / value)^2$  [oriel instr.].

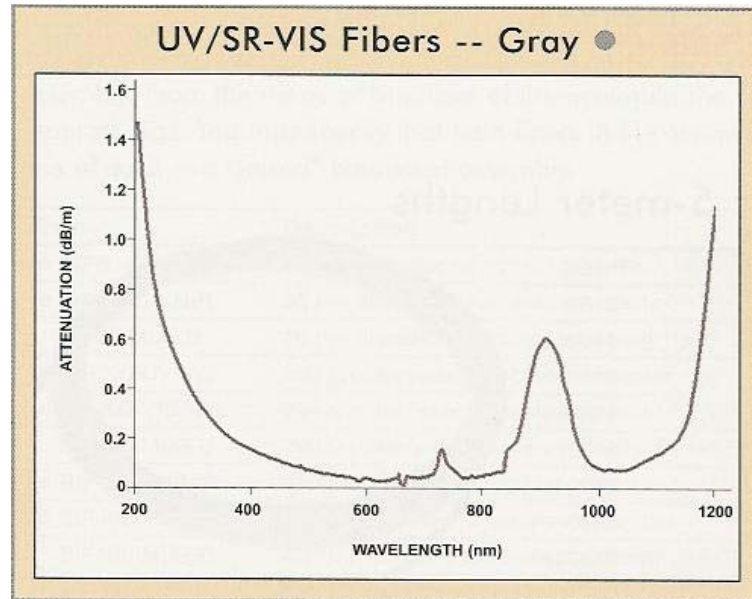
Nella Fig.2.6 si riporta un disegno schematico dello spettrografo utilizzato.

Per quanto riguarda la fibra ottica utilizzata, essa è una fibra specifica per radiazione UV-VIS in materiale antisolarizzazione con un diametro di 400 $\mu$ m e N.A. di 0.22.

Nella Fig.2.7 si riporta la curva di attenuazione della fibra ottica utilizzata.



**Fig.2.6:** schema dello spettrografo utilizzato.



**Fig.2.7:**Curva di attenuazione della fibra ottica utilizzata.

A titolo di esempio si riporta il calcolo eseguito per ricavare le quantità caratteristiche dello spettrografo ed in particolare la risoluzione spettrale  $\delta\lambda$ , da non confondere con il potere risolutivo  $\lambda/d\lambda$ .

Supponiamo per semplicità che l'angolo di incidenza del raggio luminoso sul reticolo,  $\theta_0$ , sia nullo, per cui la condizione di massimo (vedi eq. (2.6)), dato  $d$  passo del reticolo, per il primo ordine di diffrazione, diviene:

$$\lambda = d \cdot \sin \theta$$

per  $\lambda = 400\text{nm}$  e  $d = 1.7\mu\text{m}$  si trova  $\sin\theta \approx 0.235$ . ricavando  $\cos\theta$  si trova che la dispersione angolare a  $400\text{nm}$  risulta essere di circa  $0.6 \cdot 10^6 \text{ rad/m} = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ rad/mm}$ . A questo punto, sapendo che la lunghezza focale,  $L_f$ , del reticolo è di circa  $85\text{mm}$  e la fenditura di ingresso  $s$  è di  $25 \mu\text{m}$ , si trova che l'angolo  $2\Omega$  è pari a  $s/L_f = 25\mu\text{m}/85\text{mm} = 2.94 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ . La risoluzione spettrale del reticolo corrispondente a questo angolo è data da  $\delta\lambda = (d\lambda/d\theta) \cdot 2\Omega \approx 0.5\text{nm}$ . Si riassumono nella tabella seguente le caratteristiche dello spettroradiometro utilizzato.

Per quanto riguarda la banda passante dello strumento, essa è determinata dalle dimensioni del sensore e dalla lunghezza focale. Infatti, con un veloce calcolo si trova che l'angolo fra le lunghezze d'onda diffratte a  $200\text{nm}$  e  $850\text{nm}$ , è uguale a  $0.4057\text{rad}$ , utilizzando la lunghezza focale di  $8.5\text{cm}$  si trova che la dimensione del sensore è di circa  $3.45\text{cm}$ .

**Tabella2.2:**caratteristiche complessive dello spettroradiometro.

Lunghezza focale	~85mm
Risoluzione spettrale	0.5nm
(Dispersione lineare) <sup>-1</sup>	19.6nm/mm
F/#	F/2
Fenditura di ingresso	25µm
Dimensioni pixel CCD	(14•200) µm
Numero totale di pixel	2048
Intervallo spettrale	200nm÷850nm

L'ultimo anello della catena strumentale che non è ancora stato preso in considerazione è la parte di elettronica e il PC.

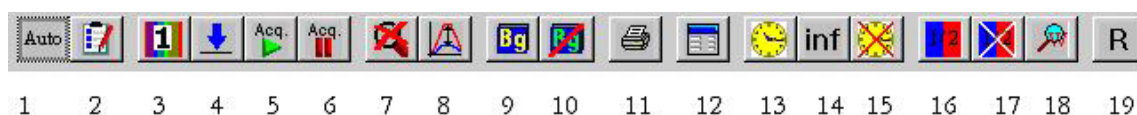
Il sensore CCD è collegato ad un personal computer tramite un software di acquisizione dati, attraverso la cui interfaccia grafica è possibile stabilire alcuni parametri di misura.

Il software è un applicativo VC++ in grado di gestire la comunicazione con lo spettroradiometro e quindi di acquisire i dati, di convertirli in unità radiometriche di elaborarli e archivarli. Le sue principali funzioni sono [manuale spectrair]:

- 1) Individuazione delle caratteristiche dello spettroradiometro mediante lettura di un file di inizializzazione-configurazione.
- 2) Programmazione dello spettroradiometro per la misura che consiste nell'impostare due parametri: il *tempo di integrazione* e il *numero di acquisizioni (o anche samples)*.
- 3) Valutazione del miglior tempo di integrazione per la sorgente in esame (*autoranging*).
- 4) Conversione dei dati acquisiti dallo spettroradiometro dal formato hardware (Pixel–Counts) al formato spettroradiometrico (Lunghezza d'onda-(W/m<sup>2</sup>)/nm).
- 5) Processamento dei dati spettroradiometrici.
- 6) Calcolo di alcune grandezze fisiche di interesse dello spettro del segnale acquisito (irradianza integrale, irradianza efficace, ecc.)
- 7) Possibilità di effettuare misure di buio (*background*) e di sottrarle automaticamente alle misure reali. Nella versione 4.0 di SpectrAir, le misure di buio avvengono in maniera automatica grazie alla presenza di un otturatore ottico automatizzato.

- 8) Visualizzazione grafica della differenza dei segnali spettroradiometrici relativi a due diverse acquisizioni.
- 9) Possibilità di dividere la finestra delle lunghezze d'onda in due sotto-finestre ciascuna caratterizzata da un proprio tempo di integrazione. Tale suddivisione può essere configurata fornendo il valore della lunghezza d'onda di separazione delle due finestre.
- 10) Memorizzazione su file dei dati acquisiti.
- 11) Importazione di file dati in diverse unità di misura per la visualizzazione grafica.
- 12) Possibilità di eseguire una serie di misure ripetitive in maniera automatica, stabilendo la data di inizio e la data di fine delle misure stesse.

La barra degli strumenti del software si presenta così:



**Fig.2.10:** Barra degli strumenti del software.

Dove i numeri, indicanti le diverse funzioni, sono indicati di seguito:

1. Autoranging: `OnAutoranging()`
2. Configurazione dei parametri per la singola misura: `OnConfigOpen()`
3. Acquisizione singola: `OnSingle()`
4. Cancellazione dei dati: `OnCancella()`
5. Acquisizione continua dello spettro: `OnPlay()`
6. Termine dell'acquisizione continua: `OnStop()`
7. Visualizzazione standard: `OnZoomrst()`
8. Ottimizzazione scala per visualizzazione: `OnAutorangeY()`
9. Misura di background: `OnUseBg()`
10. Eliminazione della misura di background: `OnNotuseBg()`
11. Stampa (non attiva)
12. Attivazione di una finestra per le misure di irradianza: `OnMeaswind()`
13. Attivazione dell'acquisizione periodica delle misure: `OnAcqPer()`
14. Informazioni sulla durata delle acquisizioni periodiche: `OnInfoAcqPer()`

- 15. Termina l'acquisizione periodica delle misure: OnStopAcqPer
- 16. Attivazione della modalità a doppia finestra: OnWin1Win2
- 17. Disattivazione della modalità a doppia finestra: OnNotUseWin1Win2
- 18. Dettagli sulle due finestre: OnZoomWin1Win2
- 19. Misure comparate su sorgente e superficie: OnMisureRiflettanza

### 3 CALIBRAZIONE

#### 3.1 L'equazione di misura

La risposta di uno spettroradiometro è un certo segnale,  $S$ , che può avere diverse unità di misura a seconda del tipo di rivelatore utilizzato e del tipo di processo che ha subito (eventuale amplificazione o utilizzo di filtri).  $S$  può quindi consistere in un voltaggio, in una corrente, una densità superficiale di materiale fotosensibile etc.

Per poter valutare questo segnale in termini della radiazione incidente da misurare, occorre stabilire la relazione che sussiste fra  $S$  e la radiazione stessa; questa relazione è fornita matematicamente dalla responsività  $R$  dello strumento, definita come il segnale di uscita  $S$  per unità di flusso incidente, come già accennato nel capitolo precedente (vedi eq. 2.15).

Lo spettroradiometro utilizzato in questo lavoro, risponde alla derivata temporale dell'energia radiante incidente, cioè quello che nel primo capitolo è stato chiamato il flusso radiante  $\Phi$ .

La definizione di responsività risulta pertanto essere:

$$R \equiv dS/d\Phi \quad (3.1)$$

le unità di misura sono  $S/W$ , dove  $S$  è l'unità di misura del segnale di uscita che, nel caso dello strumento utilizzato, è una tensione.

In pratica, lavorando con medie e non con intervalli infinitesimi, la relazione (3.1) si riduce così alla (2.15).

In generale la responsività è una funzione della direzione del flusso incidente, della posizione di questo flusso sulla fenditura di ingresso, dello spettro della radiazione incidente ed eventualmente della sua polarizzazione. Sarebbe quindi più corretto riscrivere sia  $R$  che  $S$  che  $\Phi$  come funzioni di più variabili, fra cui la posizione del flusso incidente sul rivelatore, la direzione di questo rispetto al rivelatore, la lunghezza d'onda della radiazione incidente etc. È quindi un problema multidimensionale e la dipendenza di  $R$  da tutti questi parametri è la maggiore sorgente di errore nelle misure spettroradiometriche [self study manual\_NIST].

Dal momento che ciò che viene effettivamente osservato in una misura spettroradiometrica è il segnale  $S$ , è conveniente riscrivere la (3.1), o meglio la (2.15), in un'altra forma:

$$\Delta S = \bar{R} \cdot \Delta \Phi \quad (3.2)$$

se si considera gli elementi  $\Delta S_i$ , dovuti ad una particolare variazione del flusso  $\Delta \Phi_i$ , si trova che

$$S = \sum_i \Delta S_i = \sum_i \bar{R}_i \Delta \Phi_i \rightarrow \int_{\Phi} R d\Phi = R\Phi \quad (3.3)$$

dove la sommatoria, per intervalli piccoli di  $\Delta S_i$ , tende ad un integrale e l'ultima uguaglianza è giustificata dal fatto che è stato assunto che  $R$  non dipendesse dall'intensità del flusso incidente [Nicodemus,1979].

Dal momento che la quantità di interesse da essere misurata in questa tesi è l'irradianza spettrale, è possibile riscrivere la (3.3) in funzione di tale grandezza:

$$S = R \cdot \bar{E}_{\lambda} \cdot \Delta \lambda \cdot \Delta A \quad (3.4)$$

dove  $\bar{E}_{\lambda}$  è l'irradianza spettrale media incidente sull'apertura  $\Delta A$  dello spettroradiometro in un intervallo  $\Delta \lambda$  che è la risoluzione dello spettroradiometro (in questo caso pari a 0.5nm). La (3.4) prende il nome di *equazione di misura semplice*. Risulta evidente che nella (3.4) vi sono dei parametri che non sono determinabili con una sola misura di una sorgente, per cui, per ottenere l'irradianza spettrale media di una qualsiasi sorgente sconosciuta è necessario ottenere una misura della sorgente standard utilizzata, in questo caso la lampada alogena calibrata. Se infatti  $\Delta \lambda$ ,  $\Delta A$  e  $R$  sono le stesse e  $S^S$  e  $\bar{E}_{\lambda}^S$  sono rispettivamente il segnale rivelato in corrispondenza dell'acquisizione della lampada calibrata e l'irradianza spettrale nota della lampada



calibrata, ricavata con l'equazione (1.20), l'equazione di misura per la sorgente calibrata è data da:

$$S^S = R \cdot \bar{E}_\lambda^S \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta A \quad (3.5)$$

dividendo la (3.4) per la (3.5) si ottiene:

$$\bar{E}_\lambda = (S/S^S) \cdot \bar{E}_\lambda^S \quad (3.6)$$

naturalmente l'equazione (3.6) non tiene conto di nessun effetto di dipendenza della responsività da alcun parametro.

Si elencano di seguito le situazioni in cui non è possibile utilizzare direttamente la (3.6) ed è necessario invece adottare delle tecniche di correzione per ottenere una diversa equazione di misura.

- 1) Non linearità della responsività: R dipende dalla grandezza del flusso incidente e tale dipendenza è dovuta principalmente al rivelatore e secondariamente all'elettronica presente dopo il rivelatore.
- 2) Effetti direzionali e di posizione: R dipende dalla direzione del flusso incidente e dalla sua posizione sulla fenditura di ingresso. Una possibile soluzione a questo problema è fornita dall'utilizzo di un diffusore o di una sfera integratrice.
- 3) Stray light: come osservato nel secondo capitolo, la radiazione incidente, dopo essere stata scomposta nel suo spettro dall'elemento dispersivo, dovrebbe incidere sul rivelatore in modo tale che i fasci monocromatici dispersi vadano a cadere su punti precisi e distinti del sensore CCD in funzione della loro lunghezza d'onda. In realtà spesso ciò non accade e fasci di radiazione con lunghezze d'onda diverse possono incidere nello stesso punto del sensore, dando origine ad una misura di irradianza spettrale non corrispondente a quella effettivamente presente. In particolare questo effetto è significativo quando si ha un flusso molto più intenso in una certa regione spettrale rispetto a quello presente altrove; in questo caso il flusso più intenso può essere diffuso all'interno dello spettroradiometro ed andare ad incidere in una zona del sensore CCD riservata ad altre lunghezze d'onda, quelle corrispondenti al flusso di radiazione meno intenso. Per esempio, lo spettro di emissione della lampada alogena è poco intenso nella regione UV dello spettro elettromagnetico e la radiazione proveniente dalla regione visibile o infrarossa incide sul rivelatore nelle zone riservate alla radiazione ultravioletta dando un segnale non corrispondente alla realtà. Questo punto sarà comunque visto in maggior dettaglio nei capitoli che

seguono. La radiazione in generale viene diffusa o dagli eventuali specchi presenti, o da imperfezioni del reticolo o infine dalle pareti stesse dell'involucro che contiene l'elemento dispersivo e il sensore.

- 4) Distorsione spettrale: se la quantità da misurare ha delle strutture entro la risoluzione dello strumento, lo spettroradiometro può non essere in grado di apprezzarle e fornisce un segnale *distorto*.
- 5) Polarizzazione:  $R$  dipende dalla polarizzazione della radiazione incidente e il flusso incidente è polarizzato. Questo effetto è da trascurare completamente se la radiazione da misurare è non polarizzata o con un grado di polarizzazione insignificante.
- 6) Dimensioni della sorgente: è un effetto significativo solo in misure di radianza spettrale e quando viene utilizzata una sorgente standard dalle dimensioni notevolmente diverse da quelle della sorgente da misurare. È praticamente influente quando si eseguono delle misure di irradianza spettrale [Kostkowski, 1997].

Tramite il software collegato allo strumento, come precedentemente mostrato nel secondo capitolo, è possibile eseguire una misura di buio, cioè il segnale dovuto all'elettronica in assenza di ogni tipo di sorgente, che viene sottratto direttamente alle misure successive.

In pratica questo segnale viene acquisito oscurando il diffusore e premendo l'apposito tasto del software, chiamato appunto bg (background).

Dal momento che quest'ultima operazione è stata eseguita prima di ogni serie di misure acquisite durante questa tesi, con il simbolo  $S$  in seguito sarà inteso il segnale misurato della sorgente a cui è stato sottratto il segnale di buio.

Occorre a questo punto precisare che durante il lavoro di questa tesi sono stati utilizzati due spettroradiometri distinti. L'unica differenza fra loro è che uno dei due (da ora in avanti nominato con la sigla SAIR, da SpectrAIR) possiede uno shutter automatico che consente di eseguire misure di buio in maniera automatica, mentre l'altro (nominato in seguito con la sigla SMED, da SpectraMED), non avendo tale oscuratore, ha bisogno, per eseguire le misure di buio, di essere oscurato manualmente. La parte dell'ottica interna è la medesima e quindi il tipo di caratterizzazione sarà la stessa per entrambi gli strumenti.

L'unico punto a dover essere considerato nel caso dello spettroradiometro utilizzato è l'effetto dovuto alla stray light. Infatti sia il sole che la sorgente standard utilizzata hanno una forte emissione nella regione visibile-infrarosso, mentre tale emissione risulta essere debole nella regione ultravioletta dello spettro elettromagnetico. Pertanto gli intensi flussi di radiazione visibile possono essere diffusi con più facilità all'interno dello strumento andando ad incidere nella zona del sensore riservata alla radiazione ultravioletta.

La difficoltà nella stima della stray light di uno spettroradiometro, risiede nel fatto che essa dipende dal tipo di sorgente. Non è possibile pensare di correggere il segnale di uscita di uno spettroradiometro per la stray light di una sorgente e pensare che questa correzione sia valida in ogni condizione di misura e per una diversa sorgente misurata. Infatti, la radiazione emessa da sorgenti diverse ha caratteristiche differenti e può subire riflessioni diverse all'interno dello strumento.

Dal momento che, come già detto, le sorgenti che sono state utilizzate hanno tutte una forte emissione nell'intervallo spettrale della luce visibile e parte dell'infrarosso, e una bassa emissione nella zona UV dello spettro, quello che è stato considerato in questa sede è il contributo della stray light proveniente dalla zona VIS-IR e diffuso in corrispondenza della regione del sensore riservata all'UV.

Uno dei metodi standard utilizzati per valutare l'impatto della stray light in corrispondenza di una specifica sorgente è quello di acquisire un segnale di misura della sorgente utilizzando un filtro cut-off che elimina la componente UV dello spettro. Il segnale misurato in queste condizioni è quello corrispondente alla stray light,  $S^{SRL}$ , e con questo è possibile caratterizzare lo spettroradiometro per quel tipo particolare di sorgente.

Un altro metodo è quello della stima della stray light mediante misure di irradianza spettrale solare ad angoli diversi nella volta celeste [Høiskar,2003].

Se questo effetto deve essere incluso nell'equazione di misura, la (3.4) prende una forma diversa:

$$S - S^{SRL} = R \cdot \overline{E}_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta A \quad (3.7)$$

In prima approssimazione lo spettroradiometro utilizzato stima questo segnale di stray light come la quantità di radiazione misurata fra 240nm e 245nm e lo sottrae direttamente al segnale che si misura. Questo è stato possibile perchè sia la sorgente da misurare (il sole) che la sorgente standard (la lampada alogena calibrata) non hanno alcuna emissione in quell'intervallo spettrale (le componenti spettrali del sole

inferiori a 280nm sono completamente assorbite dallo stato di ozono atmosferico, mentre la lampada al tungsteno emette da 250nm in poi) e quindi il segnale misurato in questo intervallo spettrale è sicuramente dovuto unicamente a stray-light.

### **3.2 Calibrazione**

L'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (*ISO, International Organization for Standardization*) nel VIM (*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*) definisce così il concetto di calibrazione: la calibrazione è un insieme di operazioni che stabilisce, sotto specifiche condizioni, la relazione fra valori di quantità indicate da uno strumento di misura e i corrispondenti valori realizzati da uno standard [Phillips,2001].

Il risultato di una calibrazione descrive il valore e l'incertezza ad esso associata della misura di una certa quantità sotto specifiche condizioni. Le condizioni di misura sono in generale diverse da quelle documentate nel rapporto di calibrazione e quindi, oltre alle incertezze associate alla calibrazione stessa, è necessario stimare anche le incertezze associate alla misura. Questo può risultare un compito complesso nel caso in cui lo strumento da utilizzare abbia forti dipendenze dalle condizioni ambientali.

La valutazione dell'errore dovuto alle condizioni ambientali sarà presentata nel capitolo successivo.

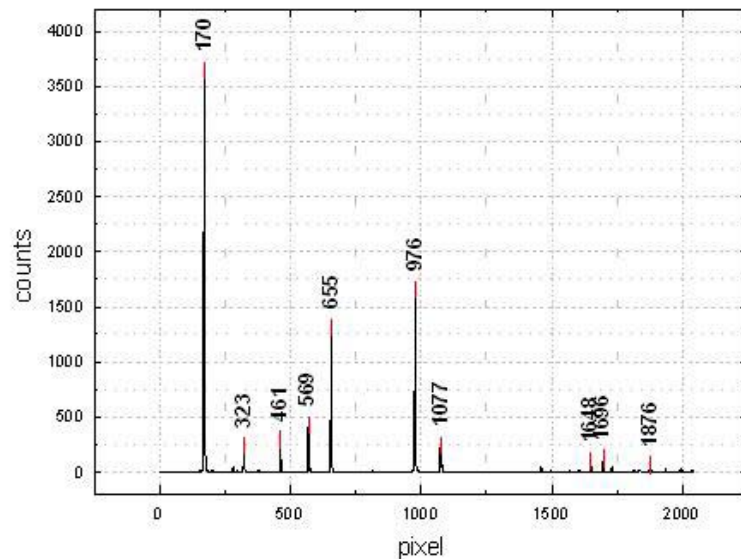
Nel caso dello spettroradiometro SAIR, è stato necessario eseguire sia la calibrazione spettrale che la calibrazione radiometrica. Mentre per quanto riguarda lo SMED, essendo esso già calibrato spettralmente, è stata eseguita solo la calibrazione radiometrica.

La calibrazione spettrale consiste nel sviluppare una procedura non molto complessa in cui ad ogni componente spettrale della radiazione incidente diffratta, viene assegnato il giusto valore in lunghezza d'onda. La calibrazione radiometrica, o in intensità, consiste nell'associare ad ogni componente spettrale misurata il giusto valore di irradianza spettrale tramite la misura della sorgente standard.

#### **3.2.1 Calibrazione spettrale SAIR**

Come accennato nel primo capitolo, la sorgente utilizzata al fine di eseguire la calibrazione spettrale è un lampada portatile al mercurio, caratterizzata da righe strette in relazione alla risoluzione dello strumento (0.5nm).

Nella Fig.3.1 si riporta a titolo di esempio una acquisizione della lampada effettuata con lo spettroradiometro. Le etichette numerate sono solo indicative delle posizioni delle righe e come si può notare la misura è stata eseguita in funzione del numero di pixel del sensore CCD.



**Fig.3.1:** Esempio di acquisizione da lampada al mercurio.

La misura di ognuna di queste righe fornisce importanti informazioni sulle caratteristiche dello spettroradiometro. La lampada al mercurio, comportandosi come una serie di diverse sorgenti di luce monocromatiche, può servire, oltre che a calibrare spettralmente lo spettroradiometro, anche a determinare la *slit-function* dello strumento a diverse lunghezze d'onda.

La slit-function altro non è che la funzione che descrive la distribuzione di intensità del segnale generato da un fascio di radiazione monocromatica, in corrispondenza del rivelatore. In sostanza è la risposta dello strumento ad un segnale di ingresso corrispondente ad una riga spettrale monocromatica ed è una delle principali caratteristiche dello strumento [NATO ASI series; Lantz,2002].

Generalmente è una funzione di forma triangolare con delle code che si estendono esternamente dalla base del triangolo.

Di norma sarebbe adeguato determinare la slit function in funzione di una sorgente monocromatica (una riga di un laser) ripetendo, se possibile, la misura a diverse lunghezze d'onda per ottenere informazioni sullo spettroradiometro in tutto l'intervallo di misura. La differenza fra la determinazione della slit function con righe laser o con acquisizioni di una lampada a mercurio risiede nel fatto che la lampada a mercurio ha anche un'emissione continua di fondo che nasconde le code della slit function.

L'intensità e l'estensione di tali code infatti danno importanti informazioni sulla quantità di stray light dello strumento.

In pratica la slit function indica la minima risoluzione possibile dello spettroradiometro.

L'intervallo spettrale di interesse va da 290nm fino a 850nm, con un interesse maggiore nella zona UVB/UVA per motivi protezionistici e per la stima, come vedremo in seguito, della quantità di ozono stratosferico.

La lampada al mercurio ha in questo intervallo numerose righe, ma è necessario prendere in considerazione solo quelle ben risolte, ossia separate da almeno  $1.5\Delta\lambda$ , dove  $\Delta\lambda$  è la larghezza di banda dello strumento ed è definita come la larghezza a metà altezza (FWHM) di una singola riga di emissione della lampada al mercurio (o alternativamente di una riga laser). Al fine di misurare la FWHM di ogni riga è necessario conoscere con precisione il valore della lunghezza d'onda corrispondente al centro della riga che può non corrispondere con la lunghezza d'onda corrispondente al massimo misurato della riga stessa. Per trovare tale valore centrale si possono utilizzare vari metodi, ma la stima migliore è data dal *metodo del centroide* [Lantz,2002]. Il centroide  $C$  è dato da:

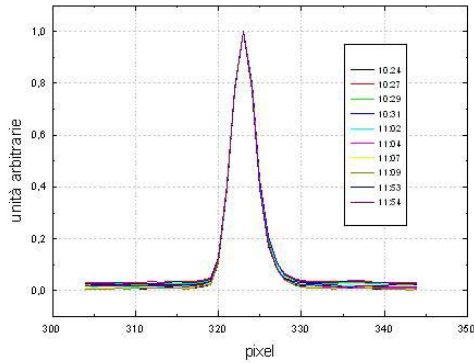
$$C = \sum_i S_i \lambda_i / \sum_i S_i \quad (3.8)$$

dove l'indice  $i$  indica quei segnali e quelle lunghezze d'onda corrispondenti ai segnali superiori allo 0.1 del segnale massimo della riga.

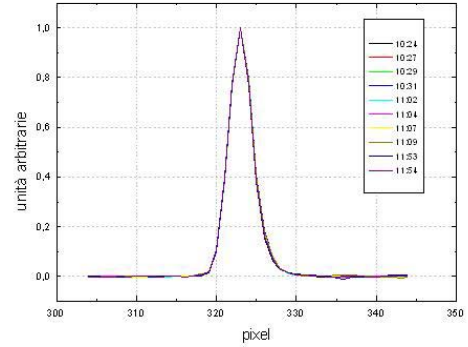
Utilizzando la lampada al mercurio è necessario, a causa della emissione continua di fondo della lampada, sottrarre ad ogni riga indagata il valore del segnale di fondo prima di stimare il centroide.

Questo è stato fatto eseguendo un fit lineare dei dati ai lati della riga per circa  $2\Delta\lambda$ , ove possibile, ossia dove non siano presenti righe adiacenti, e sottraendolo così alla riga stessa.

Nella Fig. 3.2a si mostra una scansione di una riga della lampada a mercurio con il segnale di fondo e la stessa serie di misure a cui è stato sottratto tale segnale è mostrata in Fig.3.2b.



**Fig.3.2a:**Misure della riga a 312.6nm della lampada al mercurio.



**Fig.3.2b:**Stessa serie di misure della Fig. 3.2a a cui è stato sottratto il segnale di fondo.

Un altro metodo per stimare il centro di ogni riga è quello di eseguire dei fit con delle gaussiane [Demtröder,1981].

Il confronto dei valori dei centri delle righe ricavati con i due metodi, come sarà mostrato in seguito, non presenta differenze significative.

Per completezza si riporteranno anche i valori dei centri delle righe stimati ad occhio, mostrando, come è lecito aspettarsi, che quest'ultimo metodo non è affidabile.

La fonte maggiore di errore durante la fase di calibrazione spettrale è dovuta agli effetti della temperatura che influiscono sulla posizione delle righe.

Una volta stimati tali valori è necessario procedere all'operazione di interpolazione, cioè fare in modo che lo strumento associ il giusto valore in lunghezza d'onda anche a quelle componenti spettrali non direttamente misurate, ossia per tutte le lunghezze d'onda non comprese fra quelle delle righe di emissione della lampada a mercurio.

Questo viene portato a termine da un fit polinomiale del secondo ordine [Kostkowski, 1997]:

$$\lambda = A \cdot p^2 + B \cdot p + C \quad (3.9)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda interpolata,  $p$  è il numero di pixel corrispondente e annotando i valori dei coefficienti così ricavati nel file del software spectrair.ini.

Il software stesso provvede poi ad associare ad ogni pixel, o meglio ad ogni gruppo di pixel, l'appropriato valore in  $\lambda$ .

#### **3.2.1.1 Procedura operativa**

Si presenta in questo sottoparagrafo la procedura operativa adottata durante la fase di calibrazione spettrale.

Come accennato precedentemente è necessario, prima di iniziare qualsiasi tipo di misura con lo spettroradiometro, e quindi anche per la calibrazione stessa, impostare correttamente i parametri del software di acquisizione dati dello spettroradiometro.

In particolare, per la procedura di calibrazione spettrale è necessario:

- Impostare l'acquisizione dei dati in pixel (asse delle ascisse): sul spectrair.ini porre "1" alla riga di testo corrispondente a "pixel".
- Impostare l'acquisizione dei dati in conteggi ADC (asse delle ordinate): direttamente sull'interfaccia grafica del software è presente un tasto che apre una finestra dove è possibile scegliere, oltre al tipo di acquisizione (ADC o unità di irradianza), anche il numero di medie campione.
- Smoothing: il software consente di eseguire una media mobile sui dati ottenuti. In questo caso è stata scelta una media mobile a 5 elementi. Questo parametro viene impostato sul file spectrair.ini del SW.

A questo punto è possibile iniziare la calibrazione spettrale vera e propria; si riportano quindi i passi da eseguire dopo aver configurato il software.

1. Acquisire la radiazione emessa dalla lampada a mercurio: Il diffusore dello spettroradiometro deve essere posto molto vicino alla lampada in modo da essere completamente illuminato.
2. Annotare il numero di pixel corrispondente ad ogni picco visualizzato: durante questa fase, i picchi principali sono stati fittati con delle gaussiane e il valore del centro della gaussiana è stato fornito così dal fit stesso.
3. Costruire una tabella che riporti il numero di pixel associato ad ogni picco in funzione della lunghezza d'onda corrispondente al picco stesso (valori da bibliografia).
4. Costruire il grafico relativo al punto 3.
5. Eseguire il fit polinomiale del secondo ordine e annotare i tre coefficienti così ricavati.
6. Scrivere i tre coefficienti nel file spectrair.ini del SW di acquisizione dati.



7. Convertire il file spectrair.ini in codice binario tramite il programma ICFconvert.exe, chiamare il file convertito “binary.icf”.
8. Controllare che il file di calibrazione sia stato scritto correttamente: premendo il tasto “static”, presente sull’interfaccia grafica del programma ICFconvert.exe, è possibile vedere quello che è stato convertito.
9. Inserire nell’apposita cartella \*/SpectrAIR il file binario “binary.icf”.

La campagna di acquisizione dati è stata svolta complessivamente nell’arco di due giorni, il 25 e il 29 novembre 2005.

I dati sono stati acquisiti adottando sempre la stessa configurazione sperimentale: il diffusore dello strumento è stato posizionato molto vicino alla lampada a mercurio ( $0.3 \pm 0.1$  cm), in modo da garantire la sua uniforme illuminazione (grazie alla fibra ottica è possibile spostare il sensore ove necessario senza difficoltà).

Il numero di medie scelto è di 20 per misura.

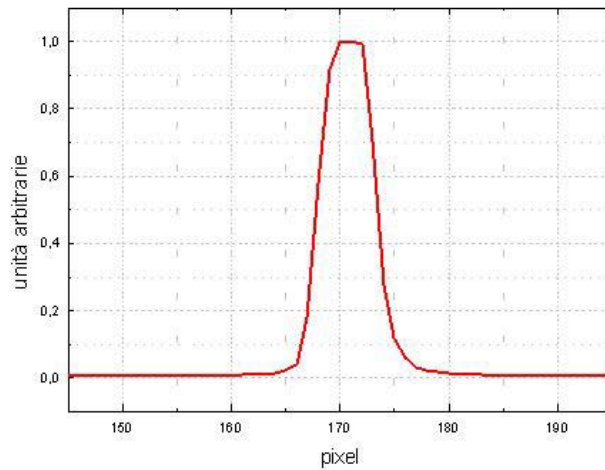
La temperatura ambiente era di circa 22C in ognuno dei giorni di misura.

Il parametro relativo alla correzione della stray light è stato impostato pari ai valori dei dati acquisiti fra 235 nm e 240 nm dal momento che in tale intervallo spettrale la lampada a mercurio non emette

#### ***3.2.1.2 Analisi dei dati***

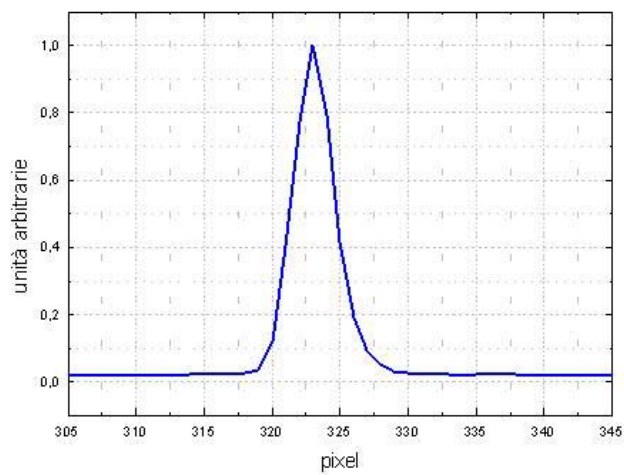
Il primo punto affrontato è stato la determinazione della slit function in corrispondenza di diversi punti sul sensore CCD; questo significa che queste acquisizioni sono state eseguite in funzione del numero di pixel.

Nei grafici che seguono sono riportate le slit function misurate in corrispondenza delle righe del mercurio della lampada utilizzata.



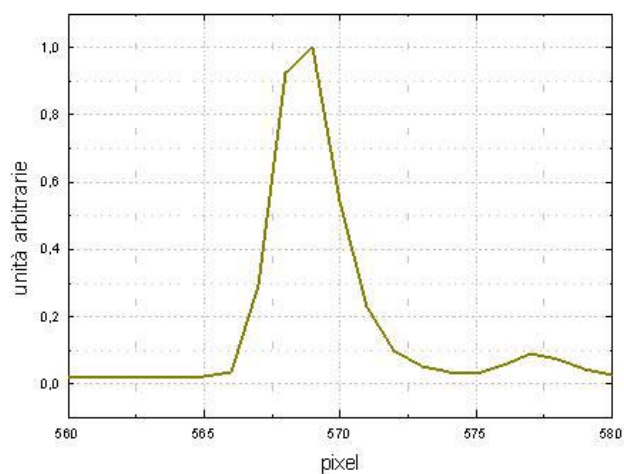
**Fig.3.3:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 170.

Questa slit function corrisponde alla riga 253.6nm del mercurio che è la riga più intensa. Come sarà successivamente evidenziato, la sua larghezza è assai maggiore della larghezza delle altre righe.



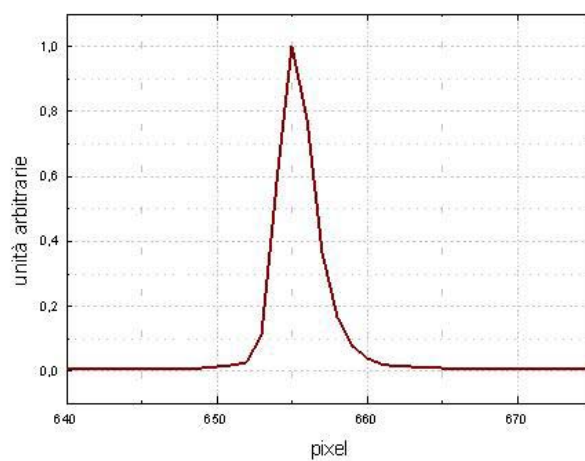
**Fig.3.4:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 323.

Questa slit function corrisponde alla riga 312.6nm della lampada al mercurio.



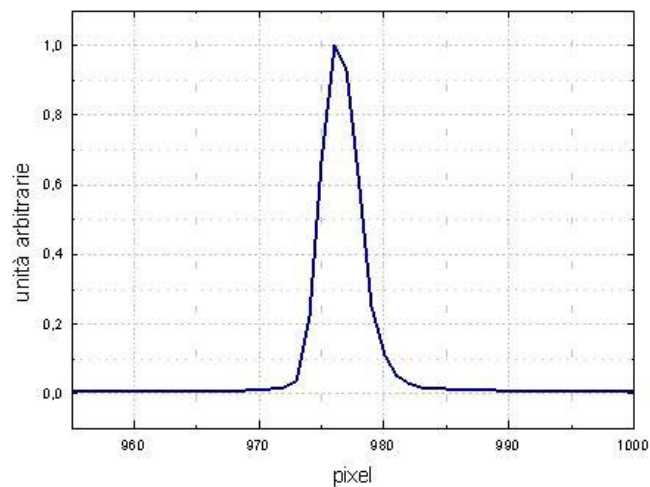
**Fig.3.5:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 568.

Questa slit function corrisponde alla riga 404.7nm della lampada al mercurio. Da notare la presenza di un certo segnale a destra della riga.



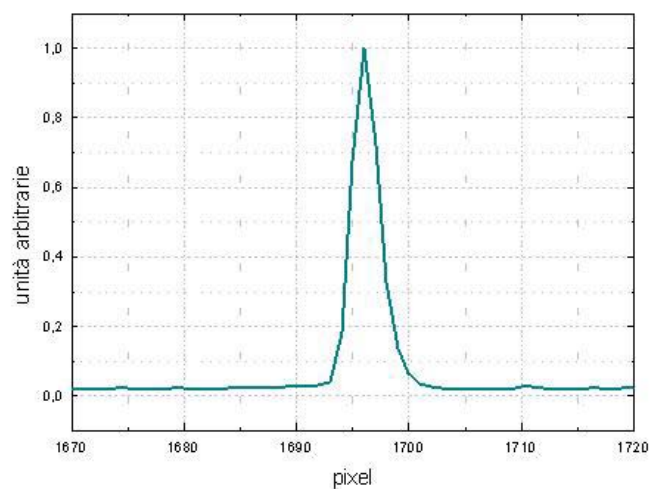
**Fig.3.6:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 655.

Questa slit function corrisponde alla riga 435.86nm della lampada al mercurio.



**Fig.3.7:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 976.

Tale slit function corrisponde alla riga 546.1nm della lampada al mercurio.



**Fig.3.8:** Slit function in corrispondenza del numero di pixel 1696.

Questa è l'ultima slit function ad essere stata misurata e corrisponde alla riga 763.5nm della lampada al mercurio.

Nella tabella che segue sono riportati i valori dei centri delle righe sopra mostrati, calcolati sia con il metodo del centroide che con il fit gaussiano, la differenza fra le

due valutazioni, una stima grossolana eseguita “ad occhio” e la larghezza delle righe stesse ottenute direttamente dai fit gaussiani.

In tutte le slit function misurate si può notare che i dati a destra alla base di ogni riga assumono un andamento diverso rispetto a quelli alla base sinistra.

Questo andamento più dolce può essere dovuto ad un effetto di scarica capacitiva all'interno del sensore CCD.

**Tabella3.1:**Centri delle righe e loro larghezza in pixel

<b>Metodo del centroide [pixel]</b>	<b>Fit Gaussiano [pixel]</b>	<b>Differenza [pixel]</b>	<b>Stima ad occhio [pixel]</b>	<b>Larghezza Riga [pixel]</b>
170.75	170.70	0.05	170,9	4.84
323.15	323.04	0.11	323,3	2.82
568.89	568.72	0.17	568,9	2.13
655.48	655.25	0.23	655,6	2.17
976.55	976.45	0.10	976,6	2.92
1696.23	1696.10	0.13	1696,4	2.20

È da notare che le differenze fra le lunghezze d'onda dei centri delle righe hanno tutte lo stesso segno; questo è dovuto al fatto che il metodo del fit gaussiano pesa in maniera maggiore le code delle righe, sottostimando così leggermente le posizioni dei centri.

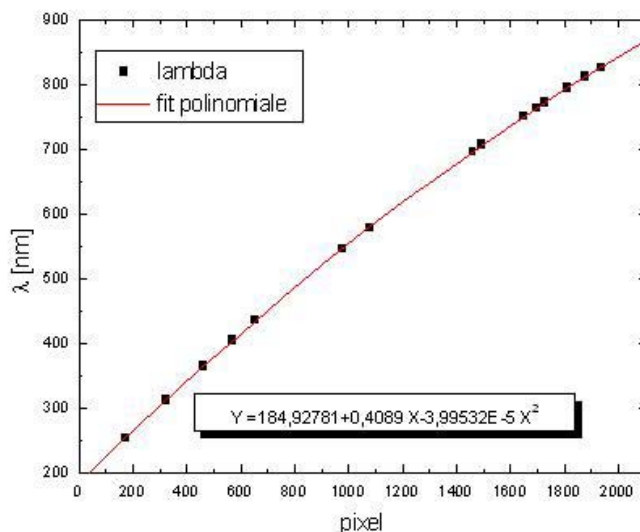
Appurato che la differenza fra le stime eseguite con il metodo del centroide o con i fit gaussiani sono comunque confrontabili fra loro, è possibile costruire la tabella di cui al punto 3 del paragrafo 3.2.1, con i centri stimati, per comodità, con i fit gaussiani.

**Tabella3.2** : Corrispondenza fra le righe misurate in pixel e i valori in  $\lambda$

#picco	pixel	$\lambda$ bibl.	#picco	pixel	$\lambda$ bibl.
1	170,70	253,6	9	1494,30	706,7
2	323,04	312,6	10	1649,00	750,4
3	461,44	365,0	11	1696,10	763,5
4	568,72	404,7	12	1728,80	772,4
5	655,25	435,8	13	1812,50	794,8
6	976,45	546,1	14	1876,10	811,5
7	1077,00	579,1	15	1934,30	826,45
8	1459,3	696,5	-	-	-

A questo punto, tramite la formula (3.9), è possibile costruire il fit di interpolazione e ricavare così i tre coefficienti A,B,C che sono poi stati inseriti nel file spectraini.ini del software dello spettroradiometro.

Nella Fig.3.9 si riporta il risultato dell'interpolazione eseguita.



**Fig.3.9:** grafico della lunghezza d'onda in funzione del numero dei pixel. Dati relativi al 25 novembre con le stime dei picchi eseguiti con fit gaussiani.

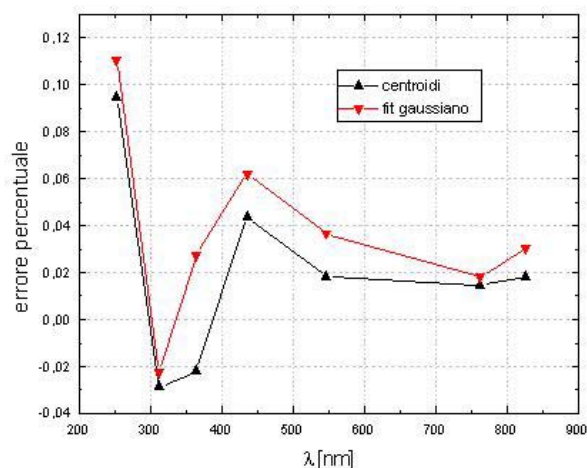
A questo punto è possibile ripetere la misura della luce emessa dalla lampada al mercurio e misurare i valori dei centri delle righe per verificare che lo strumento sia stato correttamente calibrato in lunghezza d'onda.

Nella tabella seguente (Tabella 3.3) si trovano i valori dei centri di alcune delle righe della lampada al mercurio stimati sia con il metodo del centroide che con il metodo di fit gaussiano confrontati con i valori forniti dalla bibliografia. L'errore percentuale è stato calcolato come il rapporto moltiplicato 100 fra la differenza fra i valori tabulati in bibliografia e quelli trovati con i vari metodi e i valori stessi ottenuti.

**Tabella3.3** : Errori associati alla stima dei centri delle righe.

<b>Valori da bibliografia [nm]</b>	<b>Centroide [nm]</b>	<b>Errore % Centroide [nm]</b>	<b>Fit Gaussiano [nm]</b>	<b>Errore % fit gaussiano [nm]</b>
<b>253.6</b>	253.36	0.09	253.32	0.11
<b>312.6</b>	312.69	-0.03	312.67	-0.02
<b>365</b>	365.08	-0.02	364.90	0.03
<b>435.8</b>	435.61	0.04	435.53	0.06
<b>546.1</b>	546.00	0.02	545.90	0.04
<b>763.5</b>	763.39	0.01	763.36	0.02
<b>826.45</b>	826.3	0.02	826.20	0.03

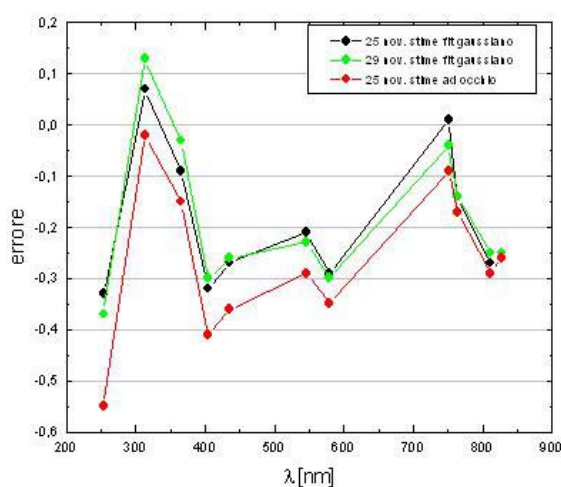
Nella Fig.3.10 si riporta il grafico degli errori percentuali dovuti ai diversi metodi di stima dei centri delle righe della lampada al mercurio.



**Fig.3.10:** errori percentuali associati alla stima dei centri delle righe di emissione della lampada a mercurio.

Come si può notare tale errore non supera l'0.12%, si può pertanto ritenere conclusa con successo questa prima fase di calibrazione spettrale.

Per completezza si riporta nella Fig.3.11 anche il confronto fra gli errori sulle misure delle posizioni dei picchi della lampada al mercurio dovuti all'utilizzo dei diversi files di calibrazione, ricavati in due giorni distinti di misura (25 e 29 novembre) utilizzando il metodo di fit gaussiano e il file di calibrazione ottenuto utilizzando la stima dei centri delle righe di emissione ad occhio.



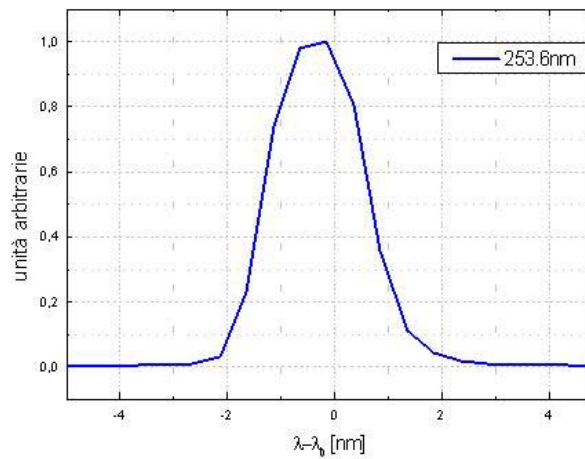
**Fig.3.11:** confronto fra metodi diversi di stima dei centri delle righe utilizzati per costruire i file di calibrazione.



Con quest'ultimo grafico risulta chiaro che il metodo di stima ad occhio non è attendibile, raggiungendo un errore in un caso superiore alla risoluzione dello strumento.

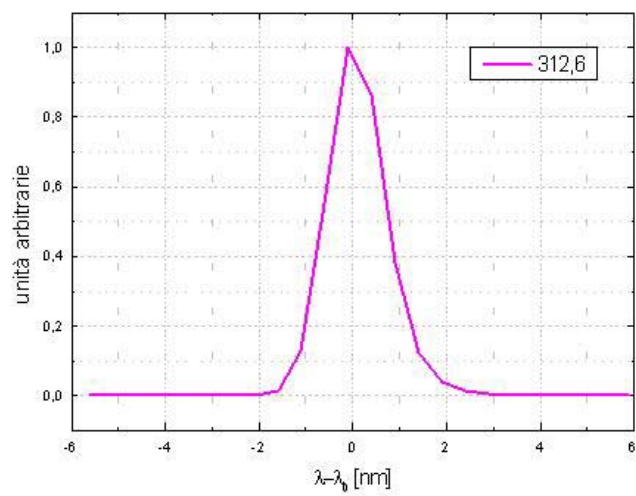
Si propongono ora alcune delle slit function vere e proprie, ossia quelle misurate in funzione della lunghezza d'onda una volta calibrato lo spettroradiometro.

Le funzioni sono graficate rispetto alla posizione fornita dalla letteratura, che è stata nominata con  $\lambda_0$  per ogni riga.

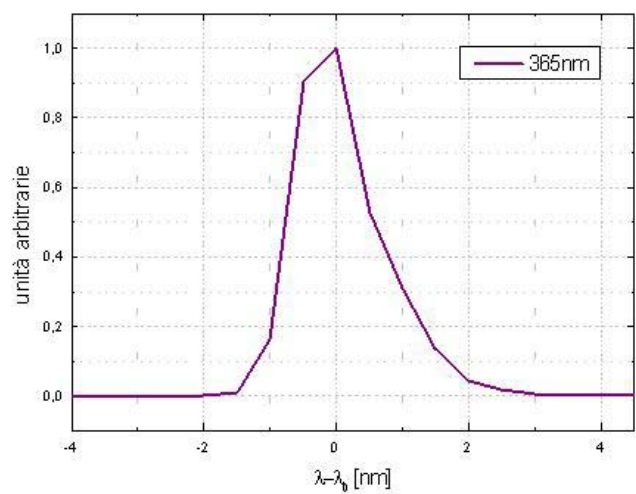


**Fig.3.12:**Slit function a 253.6nm.

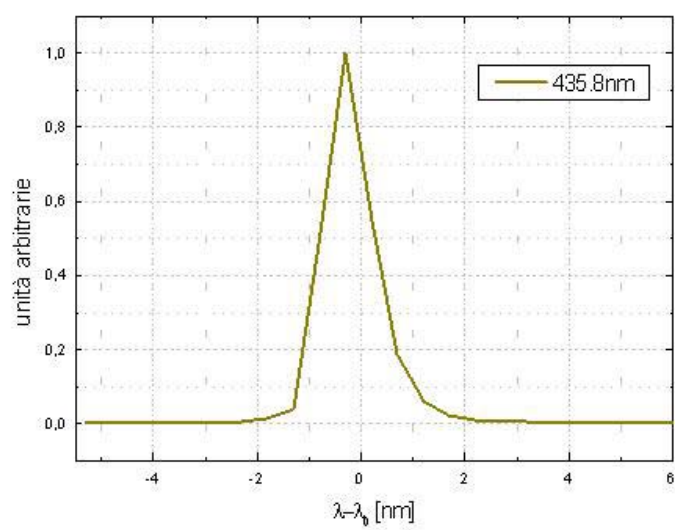
Analogamente alla misura in funzione del numero di pixel, questa riga è più larga delle altre (vedi Fig. 3.3).



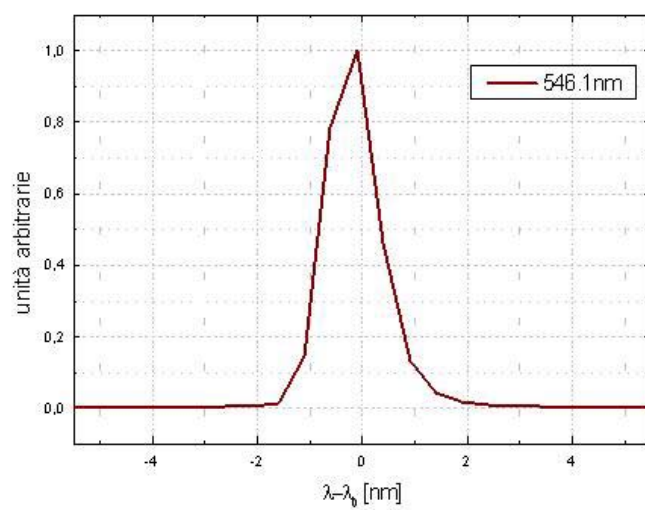
**Fig.3.13:**Slit function a 312.6nm.



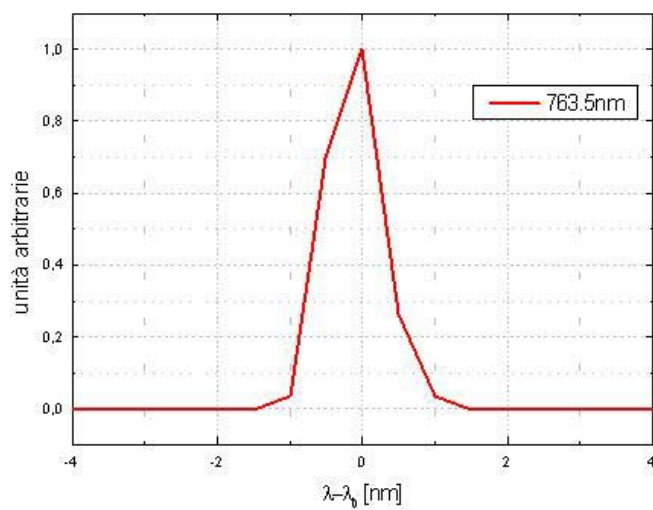
**Fig.3.14:**Slit function a 365nm.



**Fig.3.15:** Slit function a 435.8nm.

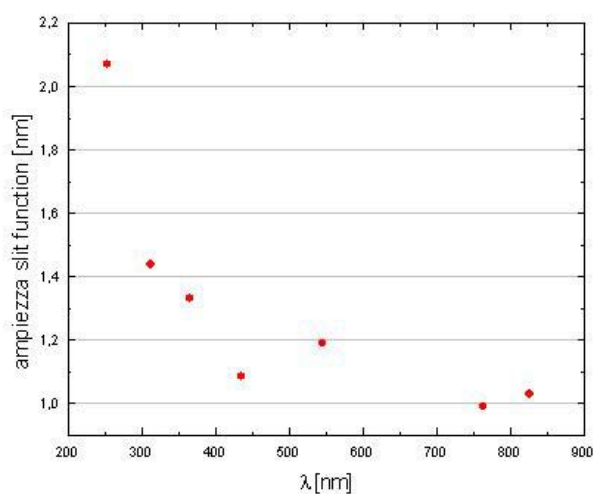


**Fig.3.16:** Slit function a 546.1nm.



**Fig.3.17:**Slit function a 763.5nm.

Si riporta ora il grafico delle ampiezze di tali slit function che danno informazioni sulla larghezza di banda dello strumento alle varie lunghezze d'onda. È da notare che l'ampiezza della slit function a 253.6nm è notevolmente maggiore delle altre, questo perchè, come già accennato questa riga è molto più intensa delle altre ed inizia ad essere importante l'effetto di autoassorbimento. Tale riga pertanto non è adatta alla determinazione della slit function.



**Fig.3.18:**Ampiezza delle slit function misurate.

Si può quindi affermare che la larghezza di banda dello spettroradiometro si aggira attorno al nanometro e poco più.

Si riassumono nella tabella seguente le quantità misurate, gli errori e le larghezze delle righe spettrali calcolate dai fit gaussiani.

**Tabella3.4** : Valori dei centroidi, errori associati e larghezza delle righe.

<b>Valori da bibliografia [nm]</b>	<b>Metodo del centroide [nm]</b>	<b>Errore percentuale</b>	<b>Larghezza Riga [nm]</b>
<b>253.6</b>	253.36	0.09	2.07
<b>312.6</b>	312.69	-0.03	1.44
<b>365</b>	365.08	-0.02	1.33
<b>435.8</b>	435.61	0.04	1.08
<b>546.1</b>	546.00	0.02	1.19
<b>763.5</b>	763.39	0.01	0.99

Osservando i valori delle larghezze delle slit function misurate, si nota che l'ampiezza delle righe decresce al crescere della lunghezza d'onda, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare considerando solo il reticolo [Lantz,2002].

### **3.2.2 Calibrazione radiometrica SAIR**

Al fine di calibrare radiometricamente uno spettroradiometro attraverso l'utilizzo di una lampada calibrata in irradianza spettrale, è necessario porre il diffusore dello strumento nella corretta posizione (ad una certa distanza dalla lampada specificata nel rapporto di calibrazione che accompagna la lampada alogena) e misurare la radiazione ricevuta nell'intervallo spettrale di interesse. L'apparente semplicità di tale procedura è ingannevole: ci sono infatti tutta una serie di errori che, sebbene a volte la procedura di calibrazione sembri corretta, rendono il risultato erraneo.

Si elencano di seguito le sorgenti di errore strettamente correlate alla procedura di calibrazione [Nato ASI series;Xu,2000]:

1. accuratezza e precisione della corrente di alimentazione della lampada calibrata: è estremamente importante mantenere la corrente di alimentazione il più stabile possibile, infatti un errore dello 0.1% sulla corrente della lampada produce un errore dell'1% nell'irradianza spettrale emessa dalla lampada stessa.

2. precisione sulla posizione del ricevitore: in base alla legge dell'inverso del quadrato della distanza, un errore nel posizionamento del ricevitore di 1mm su una distanza di 50cm corrisponde ad un'incertezza sull'irradianza spettrale ricevuta dello 0.4%.
3. stabilità delle condizioni della stanza di calibrazione: variazioni di temperatura all'interno della stanza durante le misure possono modificare sensibilmente la resistenza del filamento e conseguentemente produrre fluttuazioni nell'intensità della radiazione emessa dalla lampada stessa. Analogamente strumenti di ventilazione eventualmente presenti possono causare variazioni di temperatura che aumentano l'incertezza sulla radiazione emessa dalla lampada.
4. riflessioni dall'ambiente circostante: la presenza di superfici riflettenti all'interno della stanza di calibrazione dovrebbe essere evitata dal momento che fasci di radiazione riflessa possono raggiungere il ricevitore portando così lo spettroradiometro a registrare un segnale che non corrisponde più al solo segnale della lampada.
5. posizionamento della lampada: anche un errato posizionamento della lampada può causare errori sulla radiazione effettivamente ricevuta dal ricevitore. Tali errori sono comunque di difficile stima e generalmente sono meno significativi rispetto agli altri errori.
6. standard di calibrazione: la lampada è garantita per un certo numero di ore di utilizzo, ma a volte è possibile incontrare fluttuazioni nella luce emessa dalla lampada anche dopo poche ore di utilizzo. In questo caso la lampada andrebbe confrontata con altre sorgenti standard durante tutto il suo utilizzo, ma durante questo lavoro di tesi è stata disponibile una sola sorgente standard.
7. errori dovuti alla procedura operativa: possono essere depositi di polvere, sporco, grasso, etc. sia sulle superfici dell'involucro della lampada che sul diffusore stesso o anche riflessioni di superfici luccicanti nelle prossimità dello strumento.

La maggior parte degli errori sopra menzionati può essere evitata da un'accorta selezione del sito dove avviene la calibrazione e seguendo attentamente una procedura di calibrazione ben collaudata.

### 3.2.2.1 Procedura operativa

Analogamente a quanto proposto precedentemente riguardo alla procedura di calibrazione spettrale, si riporta in questo sottoparagrafo la procedura seguita per eseguire la calibrazione radiometrica dello spettroradiometro SAIR.

Le equazioni che saranno utilizzate sono le (3.4), (3.5), (3.6). quindi al fine di calibrare lo spettroradiometro sono necessari sia il segnale misurato della lampada alogena calibrata che i valori di irradianza spettrale forniti insieme al rapporto di calibrazione.

Lo scopo della calibrazione in irradianza spettrale è quello di determinare la responsività spettrale,  $R$ .

Dati  $S^S$ ,  $\bar{E}_\lambda^S$ , rispettivamente il segnale diretto misurato con lo spettroradiometro corrispondente alla luce emessa dalla sorgente NIST e i valori di irradianza spettrale della sorgente NIST, la funzione  $R$  è data da:

$$R = S^S / \bar{E}_\lambda^S \quad (3.10)$$

Le operazioni di calibrazione sono state portate a termine all'interno del laboratorio del C.N.R. di Pisa (sez. biofisica) dove è presente, oltre al banco ottico, una struttura in grado di limitare fortemente l'influenza di riflessioni di radiazioni sull'ambiente circostante.

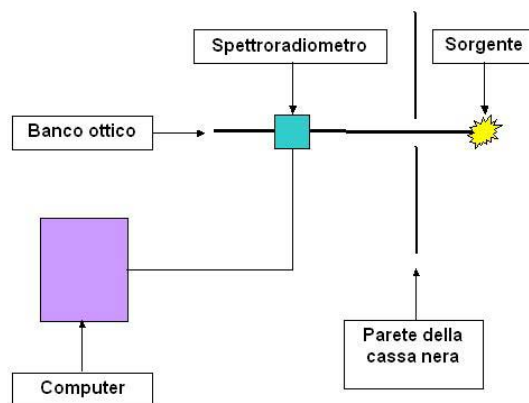
Questa unità di calibrazione è in sostanza una scatola rivestita di nero di circa 1.5m per lato con una parete costituita da una tenda, nera anch'essa, per consentire il facile accesso all'interno della scatola.

Su un'altra parete è presente un foro di 5cm di diametro, allineato con un banco ottico esterno. La presenza del foro garantisce che alla radiazione misurata contribuisca solamente la radiazione diretta e venga eliminato il contributo della radiazione diffusa.

La lampada è stata posizionata all'interno della scatola in modo tale che il filamento fosse allineato con il centro del foro.

Sul banco ottico, posizionato al di fuori della scatola nera, un supporto regolabile in altezza ha reso possibile fissare il diffusore dello spettroradiometro e posizionarlo in corrispondenza del centro del foro della scatola e alla distanza desiderata.

Nella Fig.3.19 si riporta uno schema indicativo della geometria sperimentale utilizzata.



**Fig.3.19:** Geometria sperimentale adottata.

All'interno della scatola, al fine di regolare la temperatura, può essere messo in funzione un sistema di ventilazione. La temperatura è stata tenuta sotto controllo mediante un termometro elettronico posizionato internamente all'unità di calibrazione e leggibile dall'esterno.

Il diffusore utilizzato è un diffusore speciale ideato per correggere deviazioni dalla legge di Lambert; è protetto da un involucro di quarzo e, essendo impermeabile, può essere utilizzato per misure all'aperto anche in cattive condizioni atmosferiche.

La campagna di calibrazione è stata svolta il 6 e il 7 febbraio 2006.

Il numero di medie scelte è di 30 per misura.

Dal momento che il diffusore utilizzato in parte attenuava il segnale ricevuto, è stata scelta una distanza sorgente-diffusore pari a  $(30.0 \pm 0.1)$  cm. I valori di irradianza spettrale della sorgente NIST sono stati pertanto corretti in base alla legge dell'inverso del quadrato della distanza.

La fibra ottica utilizzata è lunga 10m, necessaria per eseguire le misure di irradianza spettrale solare sul tetto della sede della Flyby.

Al fine di ottenere un segnale più elevato, specialmente nell'intervallo UVA-UVB, le misure sono state effettuate scegliendo due tempi di integrazione distinti: per  $\lambda < 320.5\text{nm}$  il tempo è stato scelto pari 10s mentre per lunghezze d'onda maggiori il tempo di integrazione, scelto dall'autoranging dello strumento, era di circa 7s.



La temperatura è stata monitorata e, durante entrambi i giorni di misura, variava fra 26°C e 27°C. Questo come si mostrerà in seguito non produce un grande cambiamento nell'emissione della lampada.

Si riportano di seguito i passi eseguiti durante la calibrazione:

1. Impostare l'acquisizione in funzione della lunghezza d'onda: porre "1" alla riga corrispondente a  $\lambda$  nel file spectrair.ini del software.
2. Stabilire la lunghezza d'onda di separazione: dal file spectrair.ini è possibile scegliere una lunghezza d'onda che consente di utilizzare due tempi di integrazioni differenti nelle due finestre in cui viene diviso l'intervallo spettrale dello spettroradiometro.
3. Scegliere l'acquisizione in conteggi: dall'interfaccia grafica premere il tasto che consente di scegliere i parametri di misura.
4. Scegliere il numero di medie campione: dall'interfaccia grafica premere il tasto che consente di scegliere i parametri di misura.
5. Posizionare il diffusore alla distanza desiderata.
6. Eseguire le misure della radiazione emessa dalla lampada,  $S^S$ , calcolarne la media ed eventualmente, se presenta dei picchi, correggere l'andamento eseguendo una media mobile o fit polinomiale.
7. Normalizzare  $S^S$  a 100ms: moltiplicare i dati per  $100/T$  dove  $T$  è il tempo di integrazione utilizzato per eseguire la misura (eventualmente se viene eseguito anche il passo 2., questa operazione deve essere eseguita per entrambi gli intervalli spettrali separatamente).
8. Calcolare tramite la formula (1.20), in base al passo dello strumento (in questo caso quindi ogni 0.5nm), l'irradianza spettrale relativa alla sorgente NIST,  $\bar{E}_\lambda^S$ .
9. Il rapporto fra  $\bar{E}_\lambda^S$  e  $S^S$  è la funzione  $R$  cercata.
10. Se  $R$  presenta dei picchi correggerne l'andamento con operazioni di media mobile o fit polinomiali.

### **3.2.2.2 Analisi dei dati**

I valori di irradianza spettrale forniti dalla formula (1.20) si riferiscono ad una distanza sorgente-ricevitore pari a 50cm, ma il segnale misurato a quella distanza con lo spettroradiometro era troppo debole.

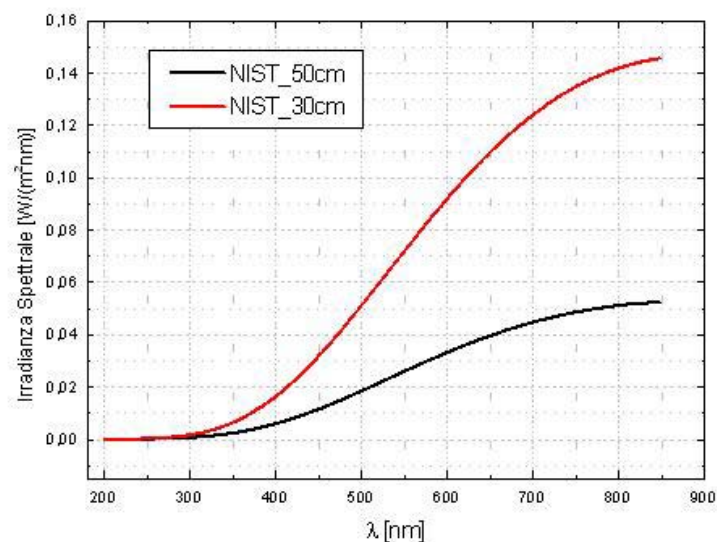
È stato necessario porre il ricevitore a 30cm dalla lampada e modificare così i valori calcolati con la (1.20) in base alla legge dell'inverso del quadrato della distanza.

Si trova così che:

$$E_{30cm}/E_{50cm} = (50/30)^2 = 2.7 \quad (3.11)$$

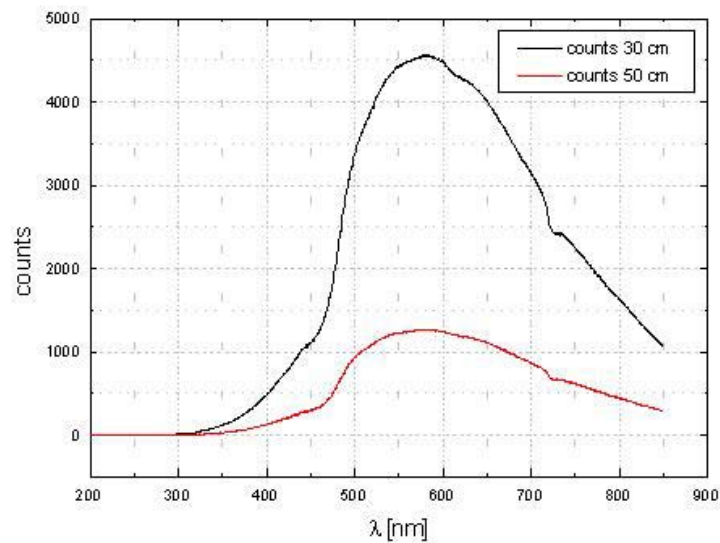
dove  $E_{30cm}$  e  $E_{50cm}$  sono i valori di irradianza spettrale emessi dalla lampada NIST e ricevuti rispettivamente a 30 cm e a 50cm.

Tramite la formula precedente, conoscendo  $E_{50cm}$ , sono stati ricavati i valori di  $E_{30cm}$ . Nella Fig.3.20 si riportano le due curve di irradianza spettrale in funzione della lunghezza d'onda relative alle due distanze di 30 cm e di 50 cm. La precisione sulla distanza è di 0.1cm.



**Fig.3.20:** Curve di irradianza spettrale della sorgente NIST calcolate per le distanze di 50 e 30 cm.

Per completezza si riporta nella Fig.3.21 il grafico con le curve dei conteggi misurati dallo spettroradiometro alle distanze di 30cm e di 50cm.



**Fig.3.21:** Curve in conteggi corrispondenti alle misure della sorgente standard NIST con il diffusore posizionato a 30cm e a 50cm dalla sorgente.

È necessario sottolineare che, la misura a 30cm è stata ottenuta utilizzando un tempo di integrazione pari a 10000ms nell'intervallo spettrale che va da 200nm fino a 320nm e di 7488ms per l'intervallo da 320.5nm fino a 850nm, mentre la misura eseguita a 50cm dalla sorgente il tempo di integrazione è stato scelto pari a 10000ms per tutto il range di misura dello strumento. Nel grafico i dati riferiti alla misura a 30cm sono stati pertanto normalizzati a 10s.

Il numero di conteggi misurati a 50cm a 300nm è pari a 1 mentre a 320nm è pari a circa 6, l'errore relativo a 320nm è dunque pari a circa il 40%.

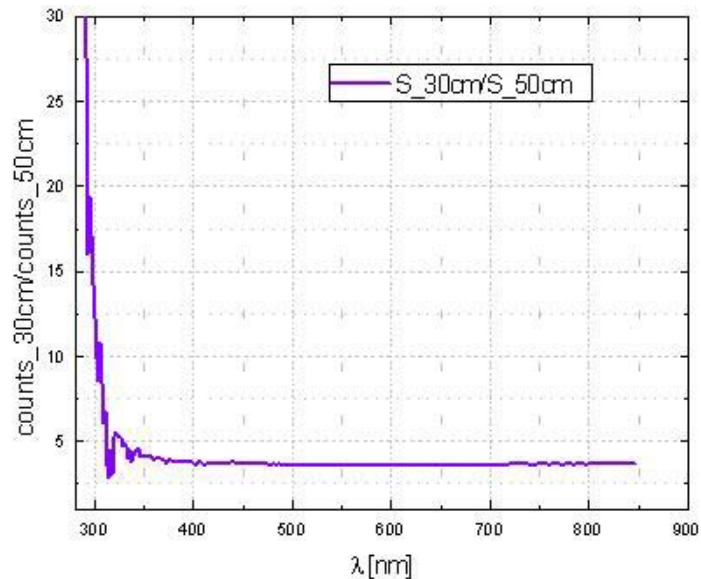
Misurando la stessa sorgente NIST a 30cm di distanza si ha che a 300nm il numero di conteggi è di circa 10, con un errore relativo pari al 30%, mentre a 320nm, essendo il numero di conteggi pari a circa 30, l'errore relativo si aggira intorno al 20%. È stato pertanto deciso di utilizzare come distanza di calibrazione una distanza sorgente-diffusore pari a  $(30.0 \pm 0.1)$ cm.

Il rapporto fra le due curve in Fig.3.21, se fosse rispettata la legge dell'inverso del quadrato della distanza, dovrebbe assumere un valore costante pari a circa 2.78, come indicato dalla (3.11).

In realtà il rapporto fra il numero di conteggi misurati a 30 cm e il numero di conteggi misurati a 50 cm si discosta notevolmente dal valore indicato dalla (3.11). Questo può essere dovuto ad effetti di riflessione multipla avvenuti all'interno dell'involucro del diffusore particolare utilizzato che ha fatto sì che lo

spettroradiometro misurasse a 30cm un segnale maggiore di quello che avrebbe dovuto misurare in base alla legge dell'inverso del quadrato della distanza.

Nella Fig.3.22 si riporta il grafico del rapporto fra le curve in Fig.3.21.



**Fig.3.22:** Rapporto fra le curve in conteggi corrispondenti alle misure eseguite ad una distanza lampada-ricevitore di 30cm e di 50cm.

Naturalmente i valori al di sotto di 320nm non vanno presi in considerazione dato l'enorme errore statistico ad essi associato dovuto all'esiguo numero di conteggi misurato.

Nella tabella 3.4 si trovano le medie del rapporto fra i conteggi a 30cm e a 50cm eseguite su diversi intervalli spettrali.

**Tabella3.4:** Valori medi di counts30cm/counts50cm

<b>Intervallo spettrale [nm]</b>	<b>Media counts30cm/counts50cm</b>
850 - 400	3.64±0.04
850 - 350	3.7±0.1
850 - 320	3.7±0.2

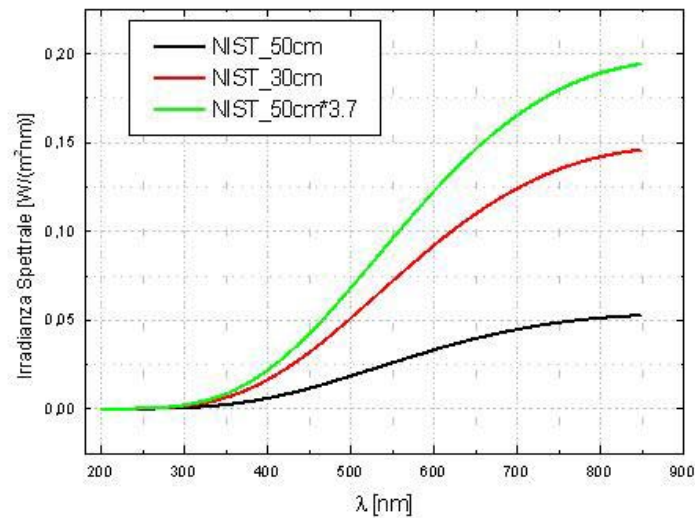
È stato quindi scelto un valore medio di 3.7 per correggere i valori di irradianza spettrale per una distanza sorgente-ricevitore pari a 30cm.

Analogamente alla relazione (3.11) si trova quindi, nel caso dello SAIR (con il diffusore sferico con involucro in quarzo):

$$E_{30cm\ CORR} = E_{50cm} \cdot 3.7 \quad (3.12)$$

questa curva è stata utilizzata per calibrare lo SAIR, correggendo così gli effetti dovuti alla presenza del diffusore utilizzato.

Nella Fig.3.23 si riportano le tre curve di irradianza spettrale della lampada NIST relative alle distanze di 50 cm, ricavata direttamente dalla formula (1.20), quella relativa alla distanza di 30 cm, ricavata moltiplicando la curva di irradianza spettrale alla distanza di 50 cm per 2.78 ed infine la curva alla distanza di 30 cm corretta per lo spettroradiometro utilizzato, ricavata quindi moltiplicando la curva di irradianza spettrale NIST a 50cm per 3.7.



**Fig.3.23:** Curve di irradianza spettrale alla distanza di 50cm, 30cm e 30cm corretta secondo la legge della distanza seguita dallo SAIR.

A questo punto è possibile calibrare lo spettroradiometro utilizzando la curva a 30cm NIST corretta (la curva in verde della Fig. 3.23).

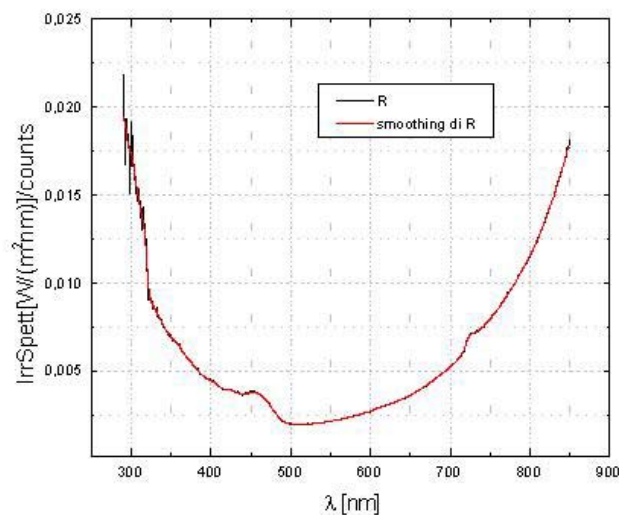
Eseguendo il rapporto fra i valori della curva NIST calcolati secondo la (1.20) moltiplicati per 3.7 e il segnale,  $S_{30}$ , misurato a 30 cm di distanza dalla sorgente si trova la funzione responsività,  $R$ , ossia la curva di calibrazione.

Dal momento che il segnale della lampada NIST misurato con lo SAIR, per lunghezze d'onda minori di circa 325nm è molto debole, la curva di calibrazione,  $R$ , tende a divergere in questo intervallo spettrale.

Per piccoli valori di  $\lambda$ , come si vedrà nel grafico seguente (Fig.3.24), è necessario, prima di inserire i valori di tale funzione nel file spectrain.ini, eseguire uno smoothing a media mobile, scegliendo il numero dei punti su cui eseguire la media in base alle caratteristiche delle variazioni della  $R$ .

Scelto quindi un numero  $n$ , il valore indicizzato con  $i$  dei dati sarà il frutto della media fra i punti compresi nell'intervallo  $[i-(n-1)/2, i+(n-1)/2]$ .

Nel grafico seguente si riporta quindi la curva di calibrazione ottenuta con anche le curve di media scelta.

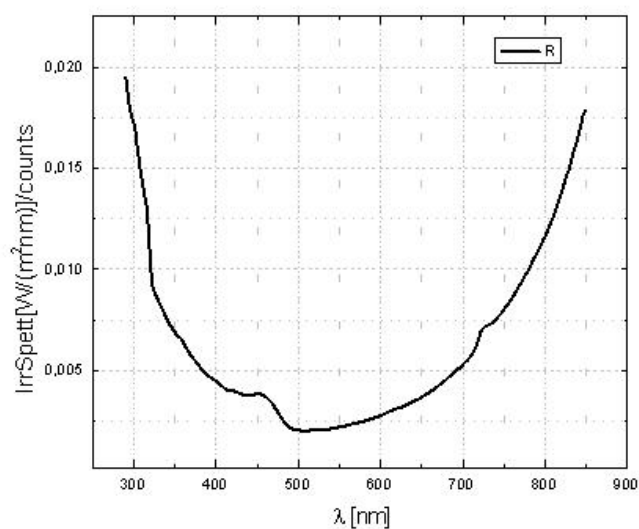


**Fig.3.24:** Responsività dello SAIR con la curva di smoothing in rosso.

La curva di smoothing in rosso è il risultato di un insieme di smoothing diversi; sono stati scelti i seguenti valori:

$\lambda \leq 350nm$	30 punti
$350.5nm \leq \lambda \leq 700nm$	20 punti
$\lambda \geq 700.5nm$	5 punti

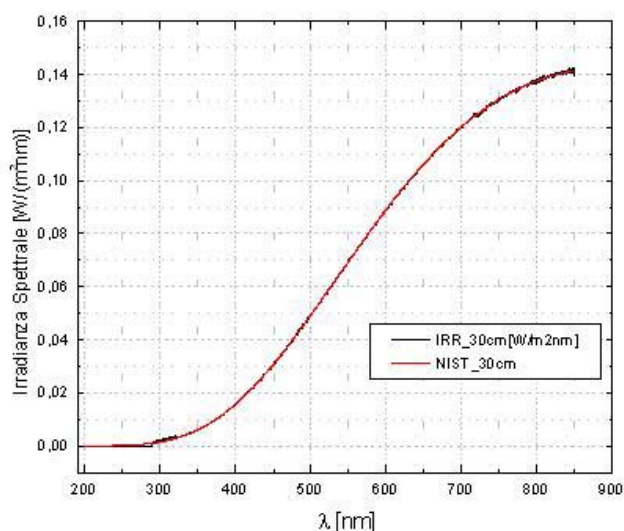
L'insieme di queste curve è quello mostrato in Fig. 3.24. Nella Fig. seguente si riporta quindi la funzione di calibrazione (o responsività) dello spettroradiometro SAIR



**Fig.3.25:** Funzione di calibrazione o responsività dello spettroradiometro SAIR.

A questo punto è stata eseguita la prova di controllo. Lo strumento è stato posizionato nuovamente ad una distanza di 30cm dalla sorgente ed è stato registrato il segnale.

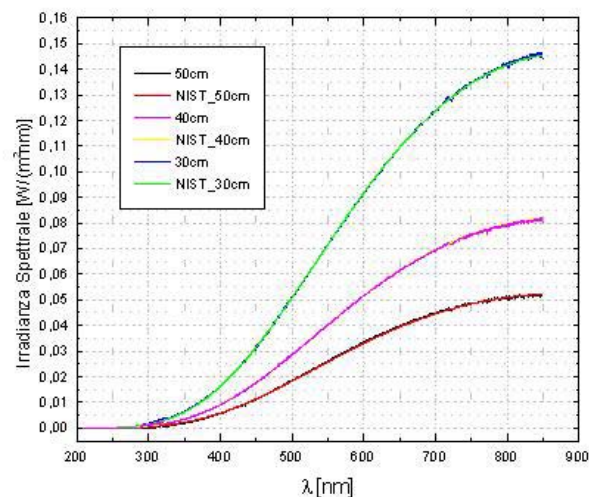
Il risultato è mostrato nella Fig.3.26, insieme alla curva della lampada NIST calcolata per una distanza di 30cm (ottenuta moltiplicando la curva NIST a 50 cm per il fattore  $(5/3)^2$ , in base quindi alla legge dell'inverso del quadrato della distanza).



**Fig.3.26:** Prova sperimentale di controllo della calibrazione eseguita per lo spettroradiometro SAIR il 6 febbraio 2006.

Come si può notare nella Fig.3.26, l'accordo fra le due curve sembra essere abbastanza soddisfacente e soprattutto il metodo di correzione utilizzato per correggere la deviazione dello strumento dalla legge dell'inverso del quadrato della distanza è risultato essere produttivo. Lo strumento infatti grazie all'utilizzo di una curva NIST corretta opportunamente, è in grado di seguire la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

Nella Fig.3.27 si riporta un'ulteriore verifica sui risultati della calibrazione. Sono state infatti eseguite delle misure anche a distanza di 40cm e 50cm dalla sorgente e confrontate con le curve di irradianza spettrale della sorgente NIST calcolate per queste distanze.



**Fig.3.27:** Misure della sorgente standard NIST eseguite alle distanze di 30cm, 40cm e 50cm.

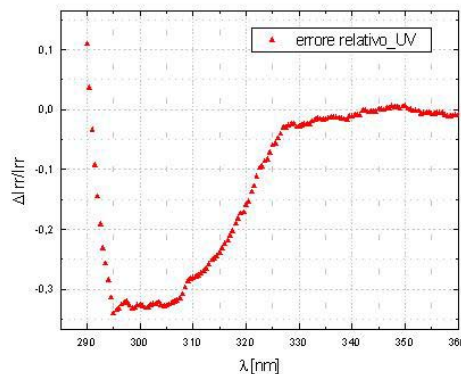
Come è possibile osservare da questo grafico, lo spettroradiometro SAIR è in grado di seguire la legge dell'inverso del quadrato della distanza e le tre misure a distanze diverse sono consistenti con i valori di irradianza spettrale della lampada calibrata NIST calcolati opportunamente in base alla distanza.

È possibile quindi affermare che, utilizzando la curva NIST a 30cm corretta per gli effetti di diffusione multipla dovuti alla presenza del diffusore sferico, lo spettroradiometro è in grado di seguire la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

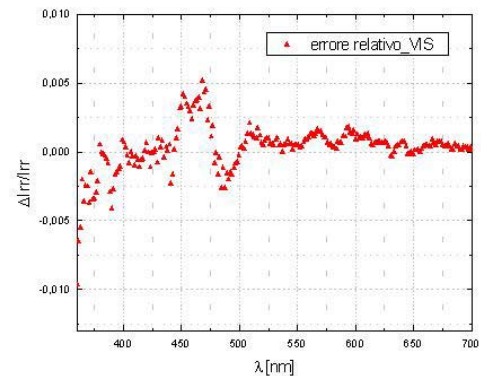


Nelle figure seguenti si riportano gli errori relativi, calcolati come il rapporto fra la differenza fra il valore di irradianza spettrale misurato e quello calcolato NIST e il valore stesso di irradianza spettrale misurato.

Per maggior chiarezza i due grafici si riferiscono a intervalli spettrali diversi; nella Fig.3.28a si trova l'intervallo UV, mentre nella 3.28b si trova il grafico dell'errore relativo associato all'intervallo spettrale VIS. Per lunghezze d'onda maggiore l'errore relativo è minore di quello mostrato nel VIS.



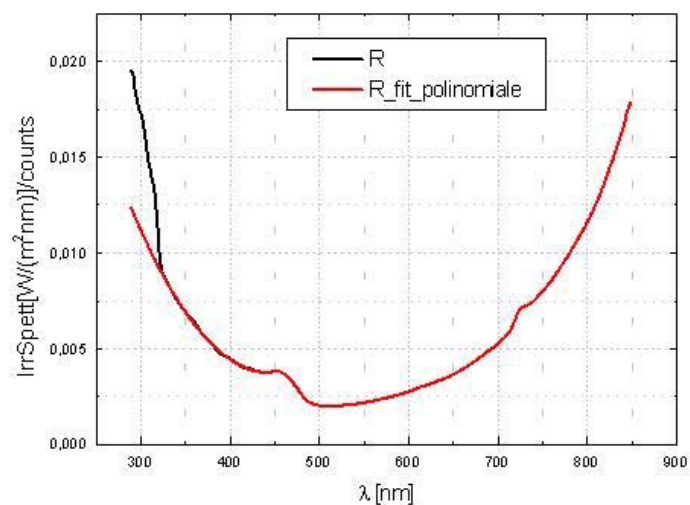
**Fig.3.28a:** Errore relativo UV.



**Fig.3.28b:** Errore relativo VIS.

Nel caso dell'intervallo spettrale UV l'errore relativo è piuttosto elevato, ma questo può essere dovuto ad una lieve divergenza della funzione di calibrazione R per lunghezze d'onda minori di 323.5nm. È quindi lecito pensare di risolvere tale problema eseguendo un fit polinomiale della R nell'intervallo che va da circa 450nm fino a 325nm ed estenderlo così fino a 290nm.

Il risultato è presentato nel seguente grafico, ma per ottenere una conferma definitiva occorre effettuare una seconda prova di misura della lampada calibrata NIST.



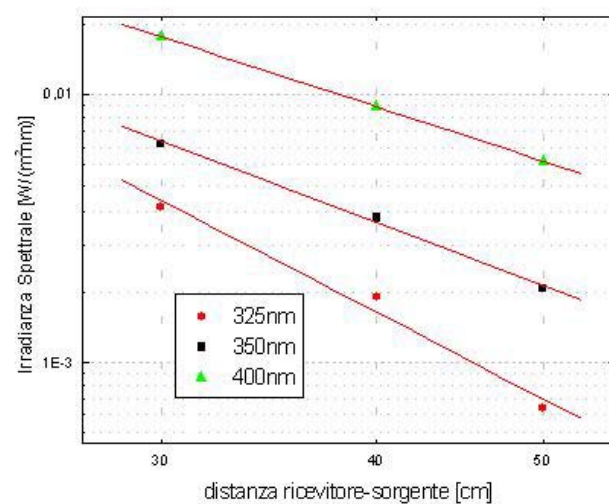
**Fig.3.29:** Nuova funzione di calibrazione R ottenuta con fit polinomiale nell'intervallo fra 325nm e 400nm.

L'equazione di fit utilizzata è  $Y=A+Bx+Cx^2$ . I coefficienti ricavati sono nella Tabella 3.5.

**Tabella3.5:** Coefficienti del fit polinomiale del secondo ordine

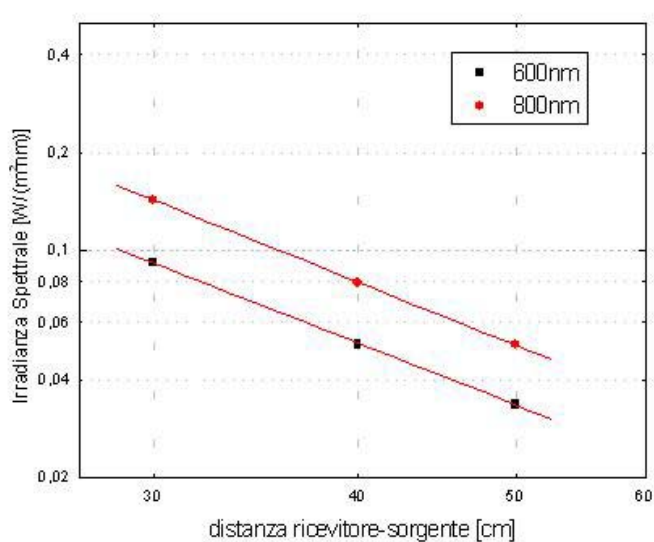
Coefficiente	valore
<b>A</b>	$0.0744 \pm 0.0004$
<b>B</b>	$(-3.17 \pm 0.02) \cdot 10^{-4}$
<b>C</b>	$(3.56 \pm 0.03) \cdot 10^{-7}$
$\chi^2$	0.99908

Nei grafici seguenti si riportano i fit lineari eseguiti a diverse lunghezze d'onda in funzione della distanza ricevitore-sorgente. Nella tabella che segue (Tabella 3.5) sono riportati i coefficienti dei fit bilogaritmici. L'equazione di fit è data da:  $\log Y = A + B \log X$ , dove y rappresenta l'irradianza spettrale e x la distanza sorgente-ricevitore.



**Fig.3.30:** Fit bilogaritmici per le lunghezze d'onda di 325nm, 350nm e 400nm.

I valori di irradianza spettrale a 325nm sono quelli che meno approssimano la legge dell'inverso del quadrato della distanza.



**Fig.3.31:** Fit bilogaritmici per le lunghezze d'onda di 600nm e 800nm.

Nella Tabella 3.6 sono riportati i coefficienti dei fit lineari e i valori del chi quadro.

**Tabella 3.6:** risultati dei fit bilogaritmici delle irradianze spettrali a diverse  $\lambda$  in funzione della distanza sorgente-ricevitore.

	<b>325nm</b>	<b>350nm</b>	<b>400nm</b>	<b>600nm</b>	<b>800nm</b>
<b>A</b>	2.5±0.7	1.4±0.2	1.30±0.03	1.87±0.04	2.12±0.02
<b>B</b>	-3.3±0.4	-2.4±0.2	-2.09±0.02	-1.97±0.03	-2.01±0.01
$\chi^2$	0.9913	0.9979	0.99996	0.99991	0.99998

Anche dai risultati dei fit lineari risulta evidente che l'accordo peggiore si trova alla lunghezza d'onda di 325nm.

Il coefficiente B, essendo il coefficiente angolare delle rette di fit, se fosse rispettata la legge dell'inverso del quadrato della distanza, dovrebbe essere pari a -2 e anche in questo caso solo la lunghezza d'onda di 325nm si discosta significativamente da questo valore.

### 3.2.3 *Analisi degli errori sulla calibrazione SAIR*

Si riassumono quindi nella tabella 3.6 gli errori percentuali associati alla procedura di calibrazione, sia spettrale che radiometrica.

Per quanto riguarda gli errori associati alla determinazione della lunghezza d'onda, si è tenuto conto dell'errore quadratico medio dovuto alla procedura di calibrazione spettrale.

L'errore associato alla precisione sulla misura della distanza sorgente-rivelatore nella procedura di calibrazione radiometrica, tenuto conto della legge dell'inverso del quadrato della distanza, è stato calcolato secondo la relazione:

$$\Delta E_{\lambda} / E_{\lambda} = 2 \cdot \Delta R / R \quad (3.13)$$

dove  $E_{\lambda}$  è l'irradianza spettrale e R è la distanza sorgente-ricevitore.

Dal momento che in questo caso  $R=(30.0\pm0.1)\text{cm}$ , l'errore percentuale da associare alla misura di irradianza spettrale è dello 0.7%.

L'errore dovuto alla stabilità della corrente di alimentazione della lampada NIST, utilizzando un alimentatore stabilizzato, è dell'1% [Gallo,1995].

Gli errori dovuti alle variazioni nelle condizioni ambientali della stanza di calibrazione sono stati tenuti sotto controllo, e pertanto sono stati ritenuti trascurabili,

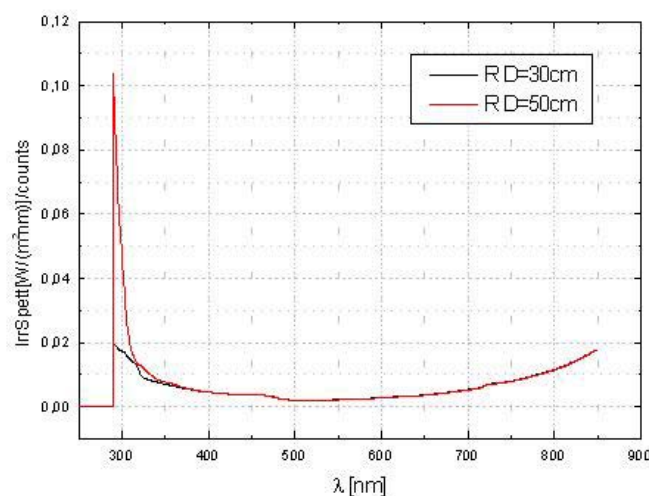
dall'utilizzo della cassa nera per quanto riguarda le riflessioni di luce all'interno del laboratorio e dall'utilizzo di un termometro che ha permesso il controllo della temperatura. Questa è rimasta stabile sui 26°C.

**Tabella 3.7:** Errori associati al processo di calibrazione di SAIR

<b>Fonti di Errori</b>	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>NIST</b>	2%	1.85%	1.85%	1.75%
<b>Posizione</b>	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
<b>Calibrazione Radiometrica</b>	30%	5%	1%	0.2%
<b>Lunghezza d'onda</b>	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
<b>Corrente</b>	1%	1%	1%	1%
<b>Totale</b>	<b>30%</b>	<b>5.5%</b>	<b>2.4%</b>	<b>2%</b>

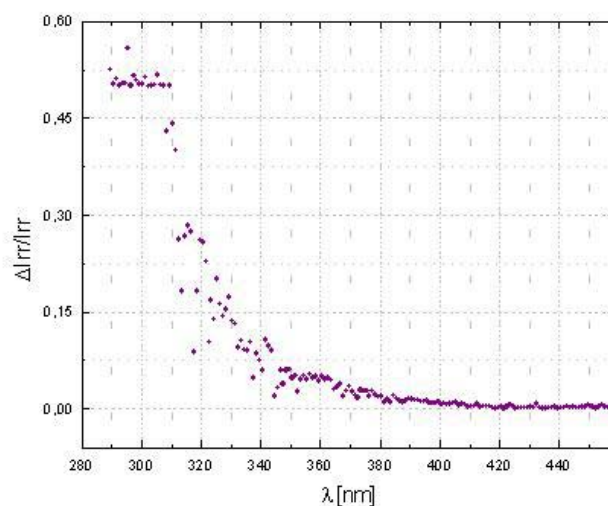
Per quanto riguarda lunghezze d'onda minori di 325nm, la fonte maggiore di errore è data dall'errore associato alla calibrazione radiometrica. Come già accennato esso può essere ridotto utilizzando una diversa funzione di calibrazione R.

Nel grafico che segue si riporta come esempio la funzione di calibrazione calcolata a 30cm e quella calcolata precedentemente a 50cm di distanza dalla sorgente.



**Fig.3.32:** Confronto fra due funzioni di calibrazione calcolate alle distanze sorgente-ricevitore di 30cm e di 50cm.

L'errore relativo nell'UV associato all'utilizzo della funzione di calibrazione calcolata per una distanza sorgente-ricevitore di 50cm è mostrato in Fig.3.33.



**Fig.3.33:** Errore relativo associato all'utilizzo della funzione di calibrazione calcolata ad una distanza sorgente-ricevitore di 50cm.

Confrontando i grafici di Fig.3.33 e di Fig.3.28a risulta evidente che anche un piccolo cambiamento nell'andamento della funzione di calibrazione R nell'intervallo spettrale che va da circa 325nm fino a 290nm, produce un notevole aumento dell'errore relativo.

Si ritiene pertanto di poter ridurre considerevolmente l'errore relativo nell'UV modificando la funzione di calibrazione R ottenuta a 30cm di distanza fra la sorgente e il ricevitore.

#### 3.2.4 Calibrazione radiometrica SMED

Per quanto riguarda lo spettroradiometro SMED, è stato necessario effettuare solamente la calibrazione radiometrica in quanto lo strumento era già calibrato spettralmente.

La procedura operativa è praticamente la stessa di quella utilizzata per calibrare lo spettroradiometro SAIR.

La campagna di calibrazione è stata svolta nei giorni fra il 6 luglio 2005 e l'11 luglio 2005.

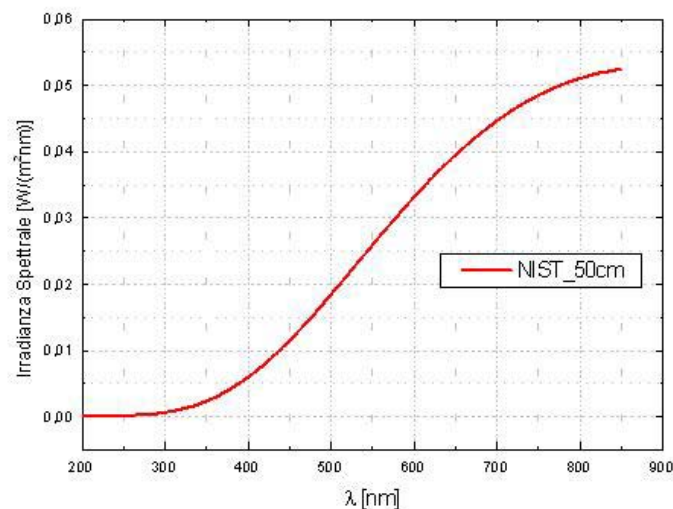
Il numero di medie scelte è di 30 per misura.

La distanza sorgente-diffusore pari a  $(50.0 \pm 0.1)$  cm. La scelta di tale distanza è stata possibile perchè, dal momento che lo SMED utilizza un diffusore piano in teflon compresso senza involucro, il segnale misurato è più elevato di quello misurato con lo SAIR (che come già precisato utilizza un diffusore sferico, sempre in teflon compresso, con un involucro in quarzo).

La fibra ottica utilizzata è lunga 2m.

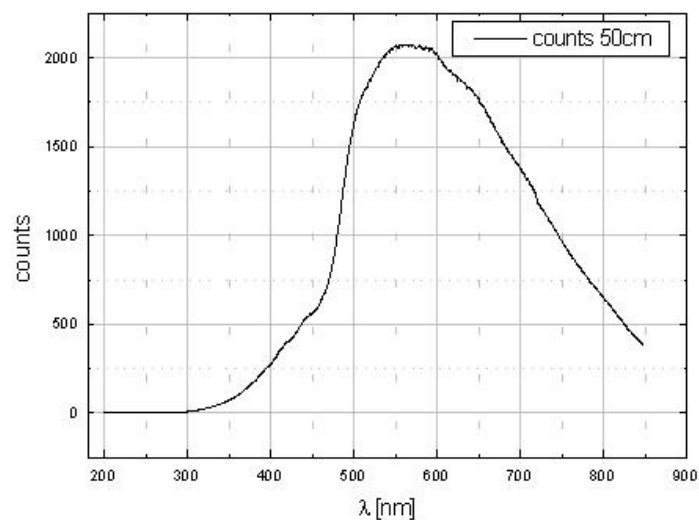
#### 3.2.4.1 *Analisi dei dati*

Analogamente a quanto fatto in precedenza, si riporta nella Fig.3.34 il grafico della curva di irradianza spettrale relativa alla lampada calibrata NIST, calcolata tramite la (1.20). tale curva si riferisce pertanto ad una distanza sorgente-rivelatore pari a 50cm.



**Fig.3.34:** Curva di irradianza spettrale della lampada calibrata NIST.

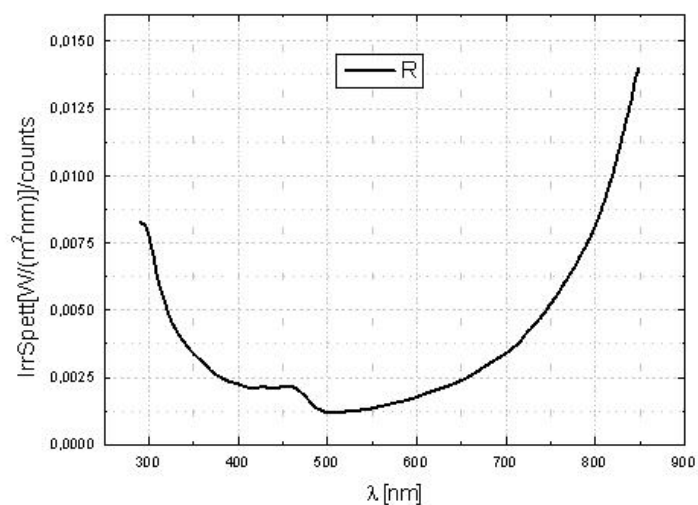
Nella Fig.3.35 si trova invece il segnale misurato a 50cm dalla lampada, visualizzato in conteggi.



**Fig.3.35:** Curva delle medie dei conteggi corrispondenti alle misure della sorgente standard NIST con il diffusore posizionato a 50cm dalla sorgente.

La funzione di calibrazione o responsività  $R$  dello spettroradiometro SMED è stata ottenuta eseguendo il rapporto per ogni lunghezza d'onda fra la curva di irradianza spettrale NIST e la curva in conteggi corrispondente alla media di una serie di misure eseguite per una distanza sorgente-rivelatore pari a 50cm.

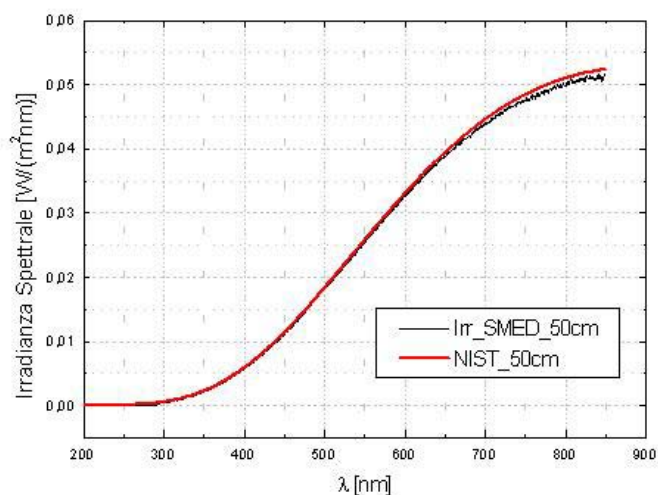
Il risultato è presentato nella Fig.3.36.



**Fig.3.36:** Funzione di calibrazione o responsività dello spettroradiometro SMED.

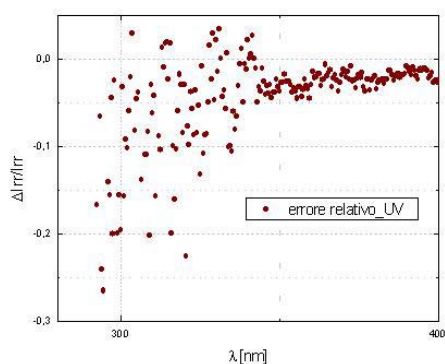


Anche in questo caso il range spettrale coperto si estende da 290nm fino a 850nm. La verifica sperimentale della calibrazione è presentata nel grafico seguente.

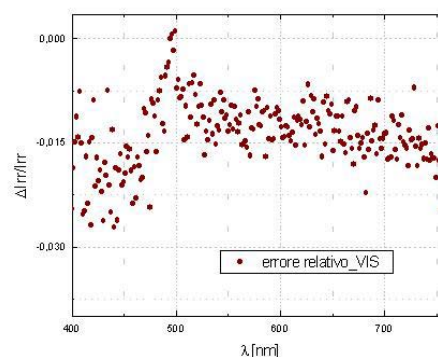


**Fig.3.37:** Prova sperimentale di controllo della calibrazione eseguita per lo spettroradiometro SMED l'11 luglio 2005.

Analogamente a quanto fatto per lo spettroradiometro SMED, nei due grafici che seguono si trovano gli errori relativi alla calibrazione in due diversi intervalli spettrali, l'UV e il VIS.



**Fig.3.38a:** Errore relativo UV.



**Fig.3.38b:** Errore relativo VIS.

L'errore relativo per lunghezze d'onda maggiori è minore di quello trovato nel VIS.

Confrontando queste due figure con quelle di Fig.3.28, si nota che l'errore nell'intervallo spettrale UV per lo spettroradiometro SMED è minore di quello dello spettroradiometro SAIR. Questo può essere dovuto all'utilizzo del diverso diffusore nei due strumenti e anche dalla presenza della fibra ottica lunga 10m nello spettroradiometro SAIR.

Nella tabella seguente si riportano gli errori percentuali ricavati per lo spettroradiometro SMED, considerando un errore sulla determinazione della lunghezza d'onda analogo a quello trovato per lo spettroradiometro SAIR.

**Tabella 3.8:** errori associati al processo di calibrazione di SMED

<b>Fonti di Errori</b>	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>NIST</b>	2%	1.85%	1.85%	1.75%
<b>Posizione</b>	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%
<b>Calibrazione Radiometrica</b>	20%	5%	1%	0.2%
<b>Calibrazione Lunghezza d'onda</b>	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
<b>Corrente</b>	1%	1%	1%	1%
<b>Totale</b>	<b>20%</b>	<b>5.4%</b>	<b>2.4%</b>	<b>2%</b>

## **4 CARATTERIZZAZIONE SMED**

### **4.1 Introduzione**

Come già accennato nel capitolo precedente, per effettuare delle misure radiometriche è necessario conoscere il comportamento dello strumento di misura utilizzato (in questo caso lo spettroradiometro SpectraMED, SMED) anche in condizioni diverse da quelle adottate durante la fase di calibrazione.

In questo capitolo vengono presentati i risultati della caratterizzazione dello spettroradiometro SMED.

In tutta la serie di misure è stato utilizzato il diffusore piano in teflon compresso e la fibra ottica lunga 2m.

Gli effetti considerati sono:

1. Ripetibilità della misura: come primo studio si presenta quello eseguito sulla ripetibilità delle misure.
2. Effetti direzionali e di posizione: questa sezione contiene gli effetti dovuti al posizionamento dello strumento rispetto alla sorgente di radiazione misurata. In questo caso la sorgente è la lampada calibrata NIST ed è stato deciso di eseguire delle misure a distanze diverse per verificare in che maniera

influiscono sia la distanza sorgente-diffusore che il mal posizionamento del diffusore sulla misura.

3. Stray light: viene proposta in questa sezione una prima stima della stray light dello spettroradiometro. A tal fine sono stati utilizzati dei filtri cut-off che eliminano completamente la parte di radiazione ultravioletta dello spettro. Come ulteriore prova sono state eseguite delle misure di radiazione solare ad angoli diversi nella volta celeste (diversi SZA, solar zenith angle).
4. Verifica della legge coseno: si riportano in questa sezione i risultati ottenuti per misure di radiazione solare a diversi SZA per alcune lunghezze d'onda per la verifica della legge del coseno.
5. Instabilità in  $\lambda$ : come già accennato precedentemente è stata studiata la dipendenza della determinazione della lunghezza d'onda in fase di calibrazione spettrale in funzione della temperatura ambientale.
6. Instabilità del rivelatore: per completezza è stato indagato l'andamento delle misure di buio in funzione del tempo di accensione dello strumento.
7. stabilità della sorgente standard: sono state verificate sia la stabilità della sorgente standard NIST che il tempo necessario a raggiungere la condizione di regime.

## **4.2 Ripetibilità della misura**

La presente campagna di misura è stata portata a termine nei giorni del 10 e 13 giugno.

È stata utilizzata come sorgente la lampada calibrata NIST dal momento che può essere considerata stabile.

L'apparato strumentale è stato smontato e riposto il 10 giugno e rimontato il 13 giugno, in modo da rendere le due misure completamente indipendenti.

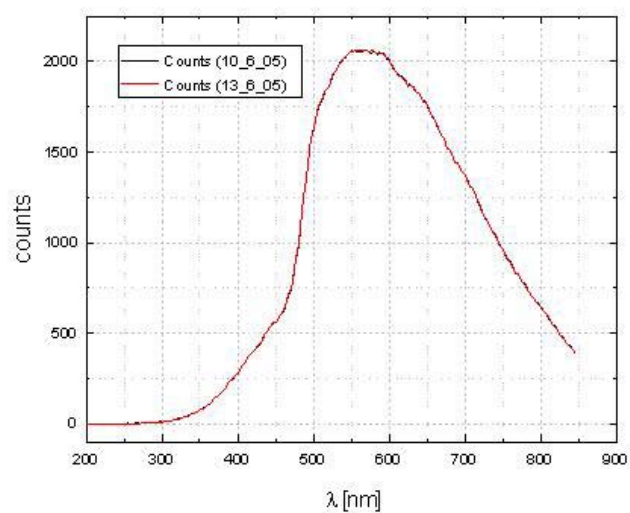
La temperatura del laboratorio, monitorata come in precedenza con il termometro elettronico, è risultata essere in entrambi i giorni di misura pari a 25°C.

Il numero di medie campione è stato scelto pari a 30.

Il tempo di integrazione, scelto dall'autoranging, è stato di 10s.

Il diffusore è stato posto ad una distanza dalla sorgente di 50cm.

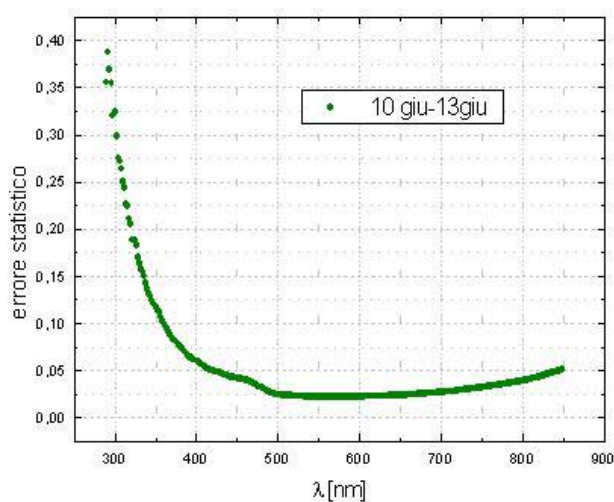
Nel grafico seguente (Fig.4.1) si riporta il risultato delle misure. Le due curve corrispondono alla media di 10 misure per giorno di misura.



**Fig.4.1:** Misure della sorgente NIST a 50cm in due giorni diversi.

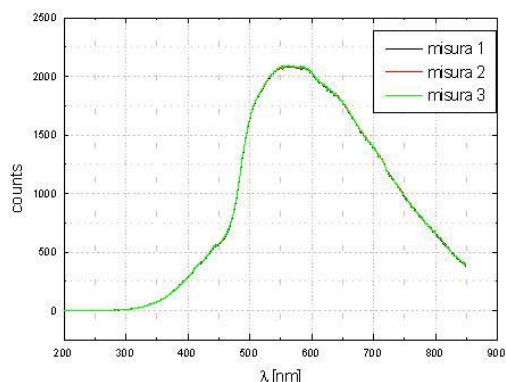
Da un veloce sguardo del grafico, sembra che le due misure siano perfettamente confrontabili fra loro.

Nella Fig.4.2 si riporta comunque l'errore statistico, in funzione della lunghezza d'onda.

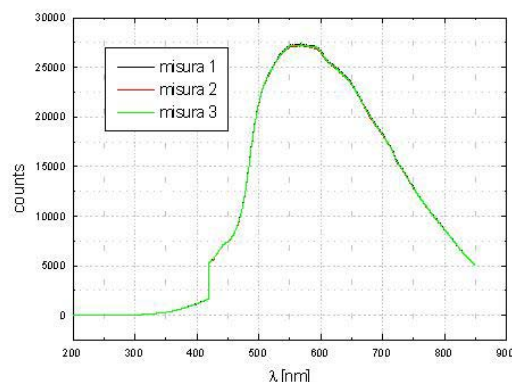


**Fig.4.2a:** Errore statistico associato alla misura della sorgente NIST ad una distanza sorgente – diffusore di 50cm.

Nella tabella 4.1 sono riportati gli errori percentuali sulle misure di ripetibilità.



**Fig.4.3a:** Serie di misure a 50cm dalla sorgente NIST.



**Fig.4.3b:** Serie di misure a 25cm dalla sorgente NIST.

**Tabella 4.1:** Errori percentuali associati alla ripetibilità della misura della sorgente NIST in due diversi giorni di misura.

	300nm	325nm	400nm	700nm
<b>Errore Percentuale</b>	30%	15%	5%	3%

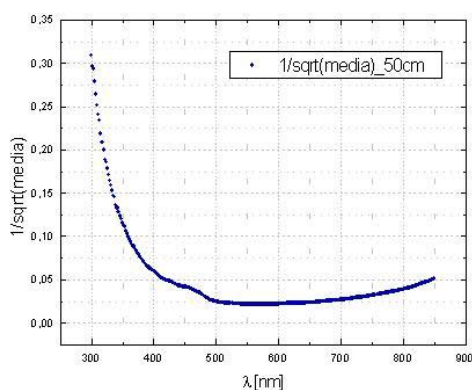
Come seconda prova sono state effettuate due serie di misure alle distanze di 50cm e di 25cm dalla sorgente. Tali misure sono state eseguite il 14/6/2005 al C.N.R.

Anche in questo caso l'apparato strumentale è stato smontato e rimontato prima di ogni misura. La prima misura è stata eseguita alla distanza di 50cm, la seconda alla distanza di 50cm, la terza nuovamente a 50cm e così via, per un totale di 3 misure a 50cm e 3 a 25cm.

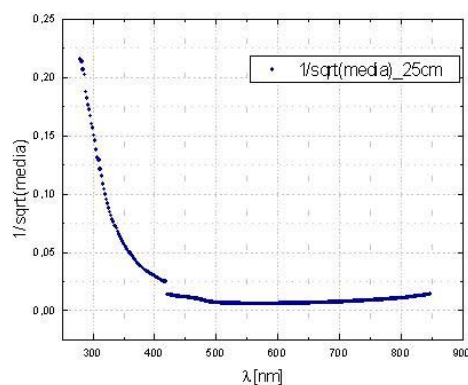
Il tempo di integrazione scelto è pari a 10s per ogni misura a 50cm, mentre per quanto riguarda la serie di misure a 25cm sono stati scelti due tempi di integrazione: per  $\lambda < 420\text{nm}$  i tempi di integrazione scelti dall'autoranging sono stati pari a 10s, mentre per lunghezze d'onda maggiori i tempi di integrazione scelti si aggiravano sui 3000ms.

Tutte le misure rappresentate nelle figure 4.3a e 4.3b sono state normalizzate a 10s.

Nelle figure 4.4a e 4.4b sono riportati gli errori statistici, corrispondenti alle misure di 50cm e 25cm.



**Fig. 4.4a:** Errore associato alle misure eseguite a 50cm dalla sorgente.



**Fig. 4.4b:** Errore associato alle misure eseguite a 25cm dalla sorgente.

**Tabella 4.2:** Errore percentuale associato alla ripetibilità della misura a 50cm

	300nm	325nm	400nm	700nm
<b>Errore Percentuale</b>	30%	15%	5%	2%

Analogamente a quanto fatto in precedenza, nella tabella 4.3 si riportano gli errori percentuali associati per alcune lunghezze d'onda di interesse per le misure a 25cm.

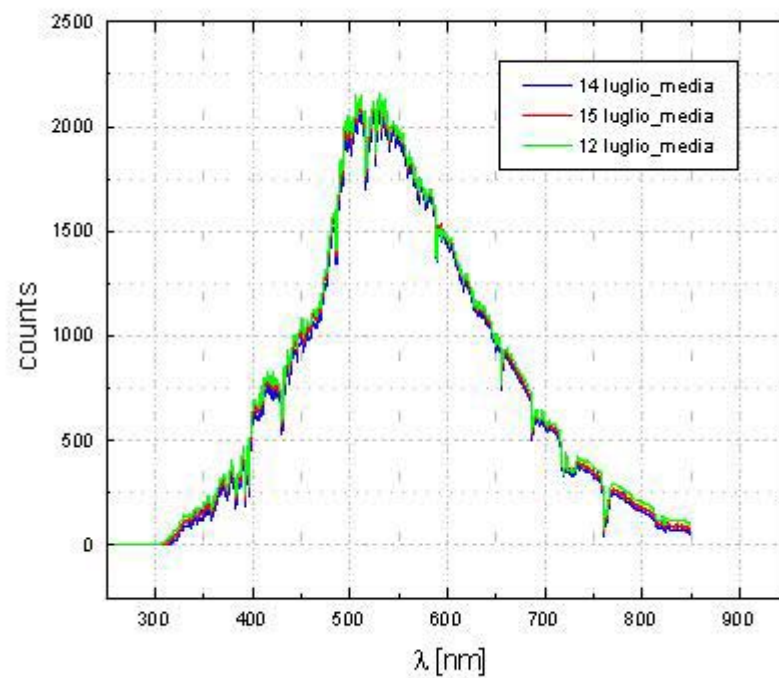
**Tabella4.3:** Errore percentuale associato alla ripetibilità della misura a 25cm

	300nm	325nm	400nm	700nm
<b>Errore Percentuale</b>	20%	10%	2%	1%

Un'ulteriore prova è stata eseguita misurando la radiazione solare nei giorni del 12, 14 e 15 luglio 2005.

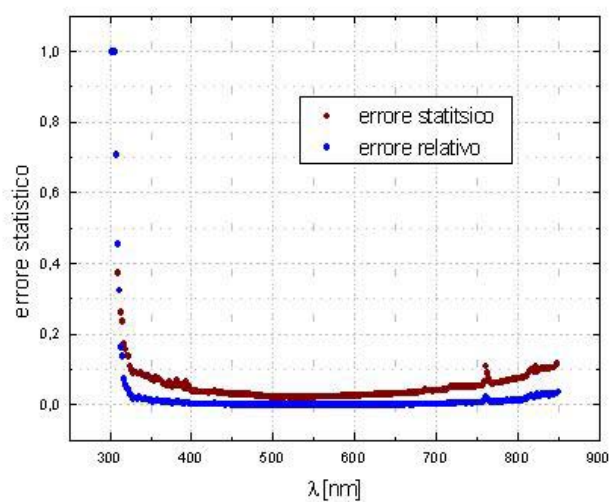
I risultati sono riportati nella Fig.4.5, le curve presenti in figura sono tutte le misure eseguite il 15 luglio (6), tutte quelle eseguite il 12 luglio (4) e tutte quelle eseguite il 14 luglio (4) con la relativa media. I tempi di integrazione scelti erano tutti nell'intorno di 127ms.

Le misure sono state eseguite nell'intorno delle 12:40 (ora legale).



**Fig.4.6:** Misure in conteggi di radiazione solare.

Nella Fig.4.7 sono presentati gli errori relativi associati.



**Fig.4.7:** errore relativo ed errore statistico.

Lo spettroradiometro in questa serie di misure non è riuscito a rilevare neanche un debole segnale al di sotto di 320nm a parte i dati del 12 luglio.



**Tabella 4.4:** errori percentuali associati alla misura di radiazione solare

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	-	3%	0.3%	0.2%

#### **4.2.1 Conclusioni**

Confrontando le misure della sorgente NIST eseguite nei giorni del 10 e 13 giugno, con quelle del 14 giugno (misure a 50cm e a 25cm) è possibile notare che gli errori relativi alla lunghezza d'onda di 300nm sono dominati dall'errore statistico sul numero dei conteggi, che si aggirano intorno ai 10 conteggi. Le fluttuazioni sono confrontabili con il numero di conteggi misurati e non è quindi possibile in questa sede ottenere un risultato migliore.

Per lunghezze d'onda maggiori gli errori percentuali sono piccoli e non presentano differenze significative fra le diverse configurazioni sperimentali adottate.

Per quanto riguarda il segnale misurato il 12, il 14 e il 15 luglio, che corrisponde alla radiazione solare effettivamente misurata in condizioni atmosferiche di cielo sereno, è possibile notare che al di sotto di circa 320nm lo spettroradiometro non è stato in grado di dare un segnale rilevabile questo a causa del breve tempo di integrazione adottato.

Per concludere si riporta nella Tabella 4.5 l'errore statistico associato alla misura. Gli errori dovuti alla ripetibilità della misura sono in questo caso inferiori all'errore statistico.

**Tabella 4.5:** errori percentuali medi associati alla ripetibilità della misura

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	30%	15%	5%	2%

### **4.3 Errori direzionali e di posizione**

Questa serie di misure è stata eseguita nei giorni del 10 e del 13 giugno 2005 all'interno del laboratorio del C.N.R. di Pisa (sezione di biofisica).

La temperatura ambientale, pari a 25 °C, è stata monitorata tramite il termometro elettronico durante tutta la serie di misure.

Queste hanno consistito in una serie di acquisizioni a distanze diverse fra il diffusore (piano in teflon compresso) e la sorgente (la lampada calibrata NIST).

La distanza massima è stata scelta pari a 64cm, avendo ritenuto troppo debole il segnale rilevato in corrispondenza a distanze maggiori, mentre la distanza minima presa in considerazione è stata scelta pari a 23cm. Tale limite è determinato dalla presenza della parete della cassa nera.

I tempi di integrazione scelti dall'autoranging, variando ovviamente con la distanza, sono riportati nella tabella seguente (Tabella 4.6).

Al fine di ottenere un segnale più intenso nell'intervallo spettrale UV è stato deciso di utilizzare due tempi di integrazione distinti per  $\lambda \leq 420\text{nm}$  (nominato nella tabella come  $T_1$ ) e per  $\lambda \geq 420.5\text{nm}$  (nominato nella tabella come  $T_2$ ).

Il numero di medie scelto è stato scelto pari a 30 per misura.

**Tabella 4.6:** tempi di integrazione utilizzati

Distanza sorgente-ricevitore [cm]	$T_1$ [ms]	$T_2$ [ms]
Da 64 a 41	10000	10000
Da 39 a 35	10000	6762
Da 33 a 29	10000	4822
Da 27 a 25	10000	3159
Da 23 a 23	10000	2675

Al fine di caratterizzare lo spettroradiometro per quanto riguarda la legge dell'inverso del quadrato della distanza, è stata eseguita una serie di misure a distanze diverse dalla sorgente.

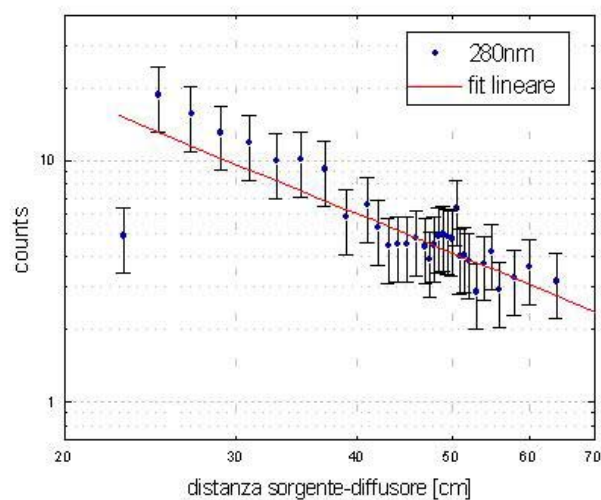
Le acquisizioni sono state eseguite a passi diversi con una spaziatura più fine intorno ai 50cm, che è la distanza adottata per calibrare lo strumento. Il passo delle misure è divenuto maggiore con l'allontanarsi dalla posizione di calibrazione. Nella tabella seguente si riportano le scelte adottate.

**Tabella4.7:** intervalli di misura e passo delle misure

Intervallo di misura [cm]	Passo [cm]
23 ÷ 39	2
41 ÷ 46	1
47 ÷ 52	0.5
53 ÷ 56	1
58 ÷ 60	2
60 ÷ 64	4

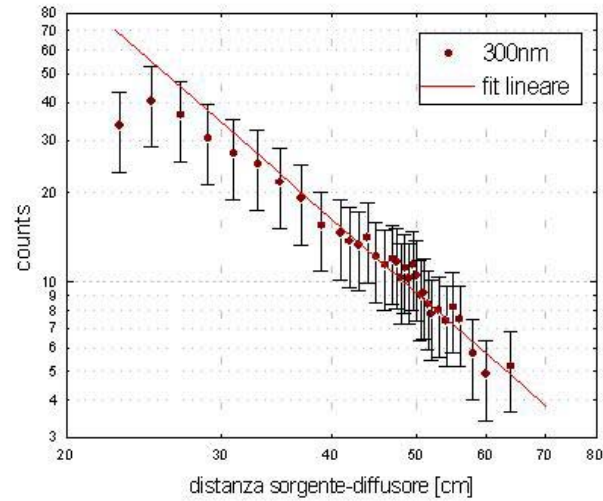
Per visualizzare meglio i risultati ottenuti, si presentano nelle figure seguenti i grafici in scala bilogarithmica dei segnali misurati in funzione della distanza del diffusore dalla sorgente per alcune lunghezze d'onda di interesse. Nei grafici è anche raffigurato il fit bilogarithmico eseguito tramite la formula  $\log Y = A + B \log X$ .

Se venisse rispettata la legge dell'inverso del quadrato della distanza, il coefficiente B dovrebbe essere pari a  $-2$ . nella tabella 4.8 si riportano i valori dei coefficienti dei fit ricavati.



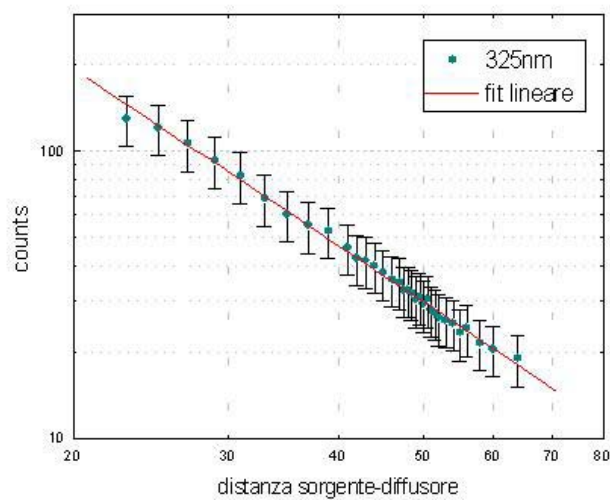
**Fig.4.8:** Andamento del segnale misurato per  $\lambda=280\text{nm}$  in funzione della distanza sorgente-diffusore.

A questa lunghezza d'onda la legge dell'inverso del quadrato della distanza viene rispettata per distanze maggiori di 23cm.



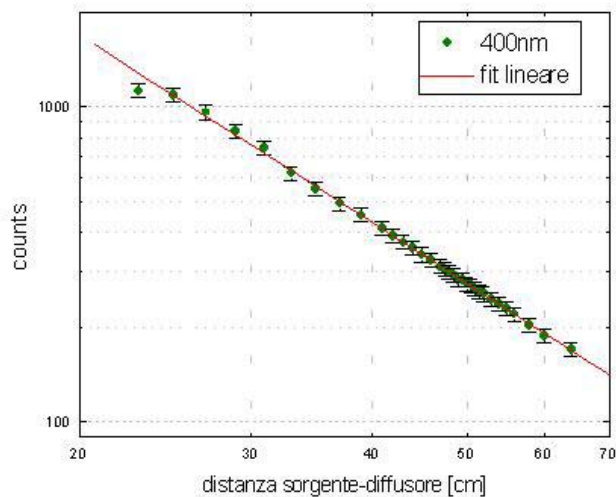
**Fig.4.9:** Andamento del segnale misurato per  $\lambda=300\text{nm}$  in funzione della distanza sorgente-diffusore.

In questo caso la legge sopracitata viene rispettata in quasi tutto l'intervallo di misura, mostrano però un lieve peggioramento per distanze minori di 25cm.



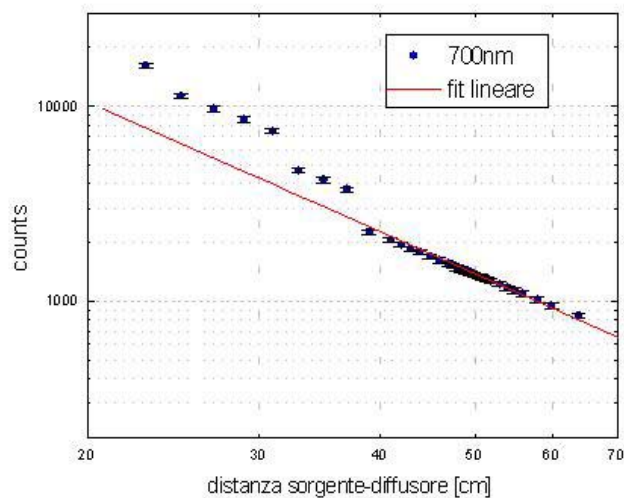
**Fig.4.10:** Andamento del segnale misurato per  $\lambda=325\text{nm}$  in funzione della distanza sorgente-diffusore.

Per  $\lambda=325\text{nm}$ , la legge dell'inverso del quadrato della distanza è rispettata sostanzialmente in tutto l'intervallo di misura.



**Fig.4.11:** Andamento del segnale misurato per  $\lambda=400\text{nm}$  in funzione della distanza sorgente-diffusore.

In questo caso si ha un'ulteriore miglioramento e il fit sembra essere piuttosto fedele ai dati misurati.



**Fig.4.12:** Andamento del segnale misurato per  $\lambda=700\text{nm}$  in funzione della distanza sorgente-diffusore.

**Tabella 4.8:**coefficienti dei fit lineari eseguiti

$\lambda$ [nm]	<b>A</b>	<b>B</b>	$\chi^2$
<b>280</b>	$3.4 \pm 0.3$	$-1.6 \pm 0.1$	-0.84134
<b>300</b>	$5.3 \pm 0.2$	$-2.6 \pm 0.1$	-0.96903
<b>325</b>	$4.94 \pm 0.06$	$-2.04 \pm 0.04$	-0.99502
<b>400</b>	$5.81 \pm 0.02$	$-1.98 \pm 0.01$	-0.99937
<b>700</b>	$6.9 \pm 0.1$	$-2.21 \pm 0.08$	-0.98123

Confrontando i valori dei coefficienti relativi ai fit lineari eseguiti sui dati ottenuti utilizzando lo spettroradiometro SMED con quelli trovati utilizzando lo spettroradiometro SAIR (Tabella3.6), si nota che lo SMED si adatta meglio dello SAIR alla legge dell'inverso del quadrato della distanza per ogni lunghezza d'onda indagata.

Nella seconda serie di misure è stato proposto uno studio sul mal posizionamento del diffusore.

Le misure sono state eseguite il 14 giugno 2005 all'interno dello stesso laboratorio del C.N.R. ed anche in questo caso è stata utilizzata la sorgente calibrata NIST.

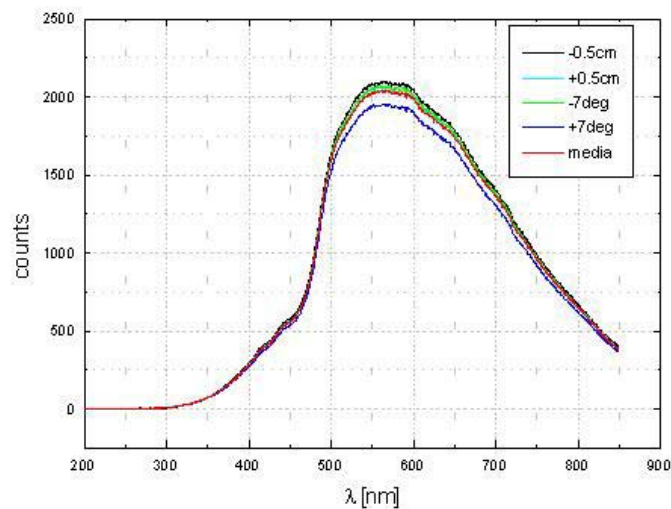
È stato misurato il segnale ricevuto dallo spettroradiometro in funzione sia dell'altezza del diffusore rispetto alla sorgente NIST che in funzione di una rotazione del diffusore rispetto al piano normale alla sorgente.

Sono state eseguite in tutto 4 misure: le prime due corrispondono ad una variazione di  $\pm 0.5\text{cm}$  in altezza del diffusore rispetto alla posizione del filamento della lampada NIST. Le seconde due misure corrispondono ad una variazione di  $\pm 7^\circ$  rispetto al piano normale della lampada NIST.

La distanza sorgente-diffusore è stata fissata a 50cm, pertanto il tempo di integrazione scelto dall'autoranging è stato di 10s.

È stato scelto un numero di campioni pari a 15.

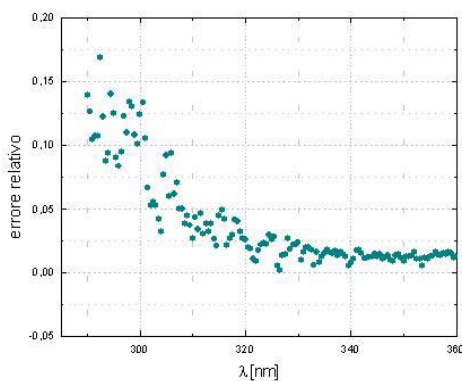
Nel grafico seguente si riportano i grafici corrispondenti alle variazioni suddette con anche rappresentata la curva della media delle 4 misure eseguite.



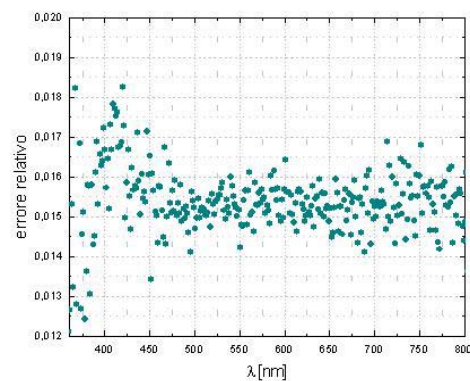
**Fig.4.13:** misure eseguite variando la posizione del diffusore rispetto alla posizione del filamento della lampada NIST.

La curva corrispondente ad una rotazione di  $+7^\circ$  si discosta sensibilmente dalle altre nella zona del VIS, questo può essere dovuto al fatto che le rotazioni, al contrario degli spostamenti in altezza, sono state portate a termine stimando l'angolo di rotazione ad occhio. Può essere pertanto una stima non molto precisa della rotazione effettivamente eseguita ma questo studio è servito principalmente ad individuare l'entità dell'errore commesso con un mal posizionamento del diffusore rispetto alla sorgente in fase di calibrazione radiometrica.

Nei grafici seguenti si riportano gli errori relativi commessi nei due intervalli spettrali di interesse: UV e VIS.



**Fig.4.14a:** errore relativo UV.



**Fig.4.14b:** errore relativo VIS.

Nella tabella seguente si riportano i valori degli errori percentuali per alcune lunghezze d'onda di interesse.

**Tabella 4.9:** errori percentuali associati al mal posizionamento del diffusore

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	10%	2%	1%	1%

#### **4.3.1 Conclusioni**

Osservando la tabella 4.9 sembra che gli errori sul posizionamento errato del sensore siano piuttosto elevati, tanto da superare l'errore calcolato in base alla legge dell'inverso del quadrato della distanza (0.4%). Sono comunque inferiori all'errore statistico.

In realtà, come già accennato, questi spostamenti sono stati esagerati al fine di visualizzare quanto è influente la posizione del diffusore sulle misure ottenute.

Si nota inoltre il discostarsi dalla legge dell'inverso del quadrato della distanza per distanze sorgente-diffusore minori di 25cm e anche maggiori per alcune lunghezze d'onda (700nm).

#### **4.4 Stima della stray light**

Al fine di stimare il contributo della stray light dello spettroradiometro utilizzato, sono stati utilizzati due metodi.

Il primo si basa sull'utilizzo di filtri cut-off che eliminano la componente ultravioletta dello spettro.

Il segnale misurato in tale intervallo spettrale corrisponde allora ad il solo segnale di stray light.

La sorgente misurata in questa fase è la lampada calibrata NIST ad una distanza sorgente-diffusore pari a 50cm e le misure sono state effettuate nel laboratorio del C.N.R.

Il numero di campioni scelto è pari a 15.

Il tempo di integrazione utilizzato è di 10s.

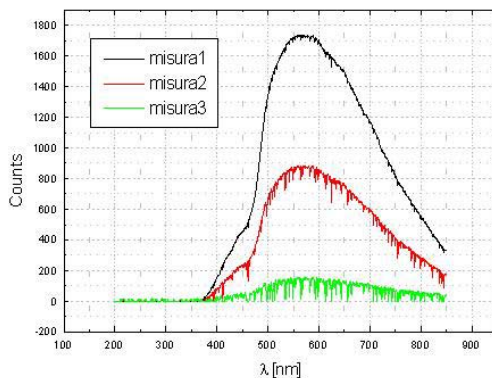
La temperatura della stanza si è mantenuta stabile a 26C.

I filtri utilizzati sono i seguenti:

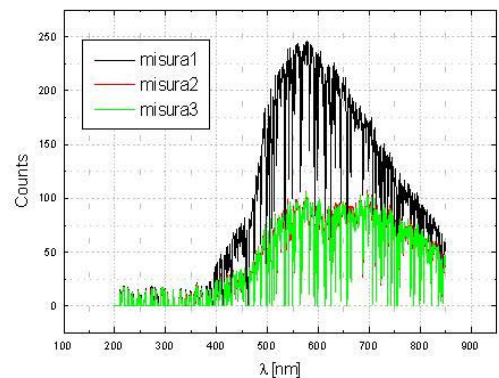


- Filtro della EALING 26-4739. Taglia il segnale in corrispondenza di lunghezze d'onda minori di 365nm.
- Filtro fornito dalla Flyby: taglia il segnale in corrispondenza di lunghezze d'onda minori di 305nm. Nel grafico di Fig.4.16a tale filtro è stato nominato come cut305.
- Filtro fornito dalla Flyby: taglia il segnale in corrispondenza di lunghezze d'onda minori di 320nm

Il filtro della EALING è stato utilizzato in due distinte configurazioni sperimentali: nella prima configurazione il filtro è stato posizionato direttamente sul foro della cassa nera (Fig.4.15a), nella seconda configurazione il filtro è stato posizionato direttamente a contatto con il diffusore. I filtri della Flyby sono stati posizionati direttamente sul diffusore portando a risultati insoddisfacenti, analoghi a quelli di Fig.4.15b.



**Fig.4.15a:** Segnale misurato con il filtro EALING nella prima configurazione sperimentale.



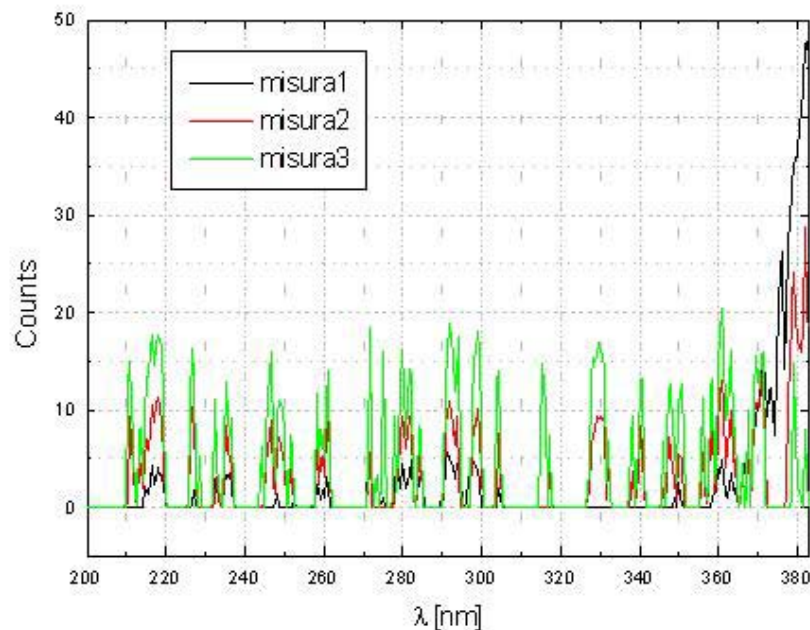
**Fig.4.15b:** Segnale misurato con il filtro EALING nella seconda configurazione sperimentale.

Risulta evidente che la seconda configurazione sperimentale non è in grado di fornire un segnale adatto allo studio.

È stato pertanto deciso di utilizzare i dati corrispondenti al grafico di Fig. 4.15° per un primo studio qualitativo.

La notevole differenza in conteggi fra le tre curve, non è da imputare all'utilizzo di una diversa configurazione sperimentale ma probabilmente a fenomeni occorsi nel filtro stesso. La curva in nero (misura 1) corrisponde alla prima misura eseguita mentre le altre due sono state eseguite in successione.

È probabile che il filtro col passare del tempo, essendo abbastanza vicino (17cm circa) alla sorgente si sia riscaldato ed abbia modificato la sua trasmissività. Nella Fig.4.16 si riporta in dettaglio il segnale di stray light rilevato.



**Fig.4.16:** Dettaglio della Fig. 4.15a nell'intervallo spettrale che va da 200nm fino a 380nm.

Si nota immediatamente, dal confronto con la Fig. 4.15a che il segnale misurato nominato con “misura1”, pur essendo il segnale che nel visibile raggiunge un valore massimo di gran lunga maggiore degli altri due, da' origine ad un segnale di stray light minore.

A questo punto sono state eseguite delle prove per cercare di determinare la dipendenza del segnale di stray light da vari parametri.

La prima prova, come mostrato in Fig. 4.17, è stata quella di graficare i massimi di stray light per alcune lunghezze d'onda in funzione del valore massimo delle tre curve del grafico di Fig.4.15a.

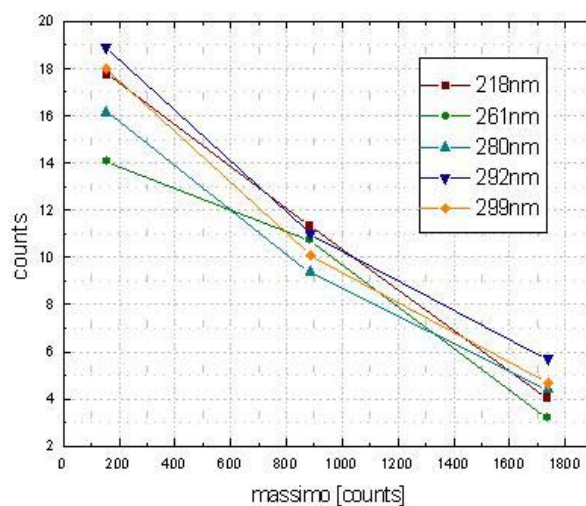
I tre punti sperimentali corrispondono al massimo misurato delle tre curve di misura rilevate.

Nella Tabella4.10 si riportano i valori di tali massimi.

**Tabella4.10:**Valori dei massimi a  $\lambda$  diverse in funzione del valore massimo della curva di misura corrispondente.

	Max [counts]	Max $\lambda=218\text{nm}$ [counts]	Max $\lambda=261\text{nm}$ [counts]	Max $\lambda=280\text{nm}$ [counts]	Max $\lambda=292\text{nm}$ [counts]	Max $\lambda=299\text{nm}$ [counts]
Arpat_misura1 (nero)	1736.275	4.04	3.19	4.41	5.70	4.66
Arpat_misura2 (rosso)	884.130	11.32	10.72	9.36	10.98	10.10
Arpat_misura3 (verde)	155.912	17.74	14.07	16.14	18.88	18.00

Nella Fig.4.17 sono raffigurati i grafici dei dati presenti nella tabella 4.10.



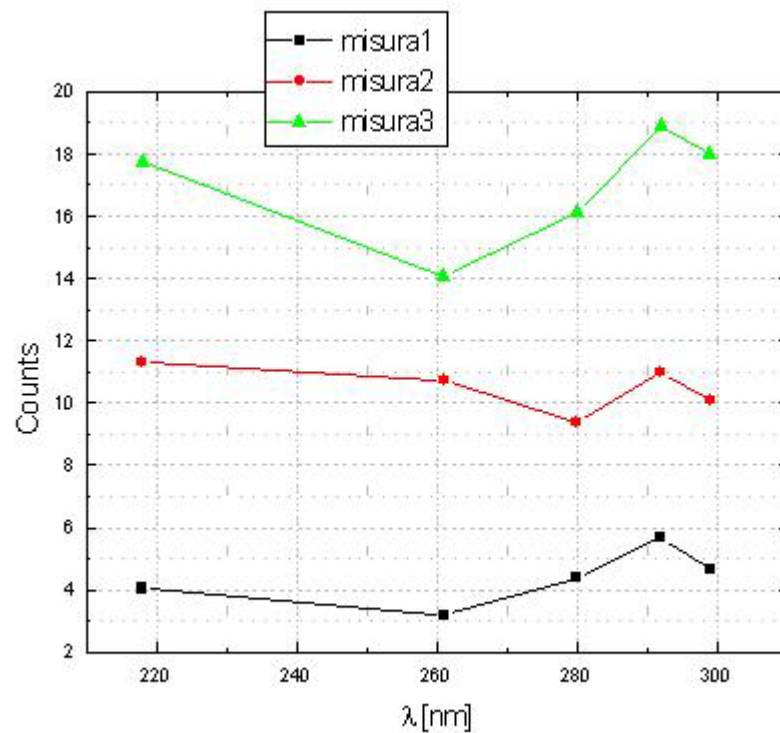
**Fig.4.17:** Grafico dei valori dei massimi del segnale di stray light per alcune lunghezze d'onda in funzione del valore massimo misurato delle tre curve di Fig. 4.15a.

Al fine di visualizzare una qualche dipendenza, sono stati eseguiti dei fit lineari sui dati di Fig. 4.17. l'equazione è data da  $Y=A+BX$  e i coefficienti sono stati riportati nella tabella 4.11.

**Tabella4.11:**Coefficienti dei fit lineari eseguiti sui dati in Fig. 4.18

$\lambda$ [nm]	A	B	$\chi^2$
218	$19.05 \pm 0.09$	$-0.00867 \pm 0.00008$	-0.99996
261	$15.7 \pm 1.3$	$-0.007 \pm 0.001$	-0.98507
280	$16.8 \pm 1.4$	$-0.007 \pm 0.001$	-0.99089
292	$19.5 \pm 1.5$	$-0.008 \pm 0.001$	-0.9873
299	$18.7 \pm 1.4$	$-0.008 \pm 0.003$	-0.98857

La seconda prova è consistita nell'eseguire il grafico dei valori dei massimi misurati in corrispondenza del segnale di stray light in funzione della lunghezza d'onda corrispondente. Il risultato è presentato in Fig.4.18.



**Fig.4.18:** Grafico dei valori dei massimi del segnale di stray light per le tre curve di misura in funzione della lunghezza d'onda.

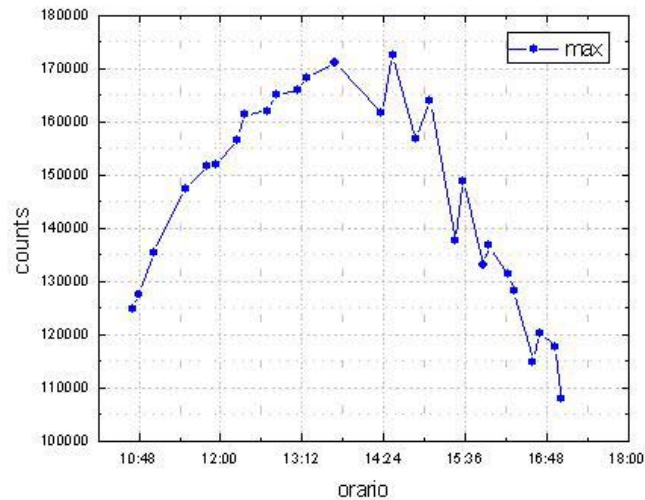
Un secondo metodo di stima della stray light viene portato a termine dallo studio della radiazione solare incidente sul diffusore ad angoli diversi nella volta celeste.

Le misure sono state eseguite nell'arco di una giornata, il 14 luglio 2005, nel cortile della sede A.R.P.A.T. di Pisa dalle ore 10:30 fino alle ore 17:00, in condizioni atmosferiche di cielo sereno.

Non è stato fatto uso di alcun filtro e il segnale è stato acquisito in conteggi.

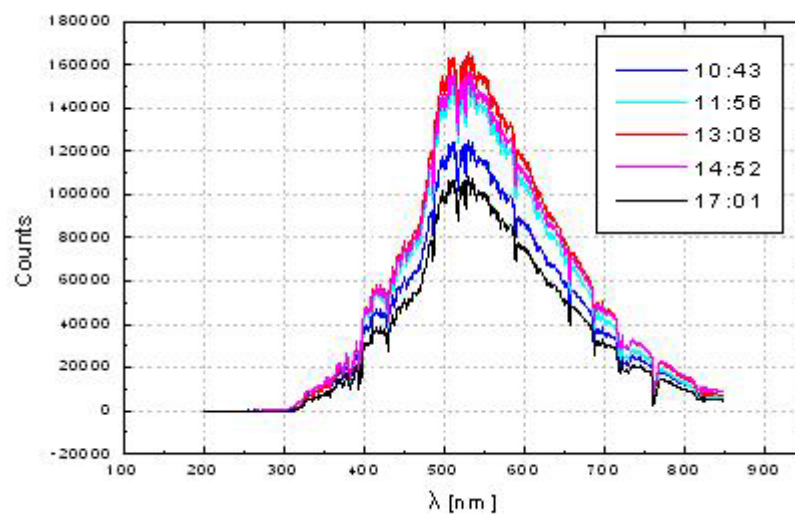
Dal momento che l'intensità della radiazione solare ovviamente varia con il passare del tempo (raggiungendo un valore massimo intorno all'una e trenta), i tempi di integrazioni utilizzati durante le misure sono stati differenti. È stato

pertanto necessario normalizzare tutte le misure presentate in seguito ad un tempo di integrazione comune pari a 10s. Nel grafico di Fig.4.19 si riportano i valori dei massimi misurati in funzione dell'ora di misura (ora legale).



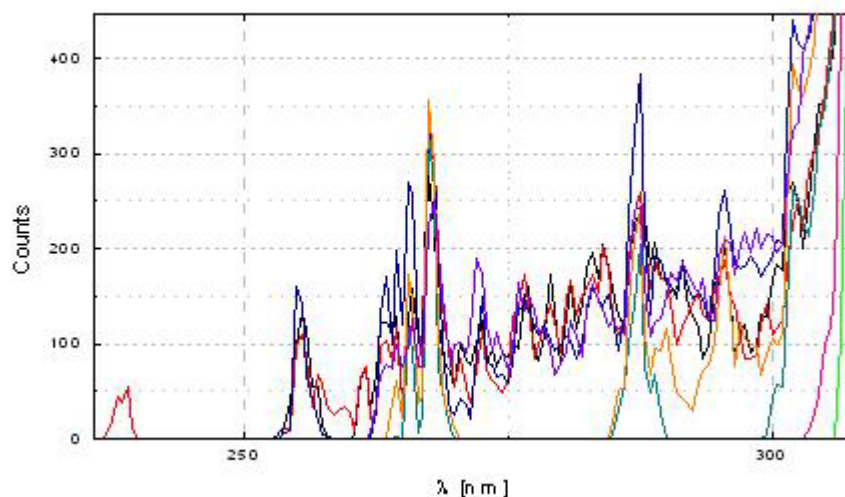
**Fig.4.19:** Valori in conteggi dei massimi delle curve di radiazione solare misurate in funzione dell'orario di misura.

Nella Fig.4.20 si riportano alcune delle misure eseguite nell'arco della giornata. Tale figura serve solo per dare un'idea delle variazioni in conteggi che occorrono durante le misure.



**Fig.4.20:** Misure in conteggi di radiazione solare ottenute durante la giornata del 14 luglio 2005.

Nella Fig.4.21 si riporta un particolare della Fig. 4.20.



**Fig.4.21:** Particolare della Fig. 4.20. intervallo spettrale corrispondente all'ultravioletto.

Osservando la Fig.4.22 si può affermare che il segnale misurato in corrispondenza di  $\lambda < 280\text{nm}$  sia dovuto esclusivamente a stray light, dal momento che al di sotto di tale lunghezza d'onda la radiazione solare è completamente assorbita dall'ozono stratosferico. Si può anche osservare che tale segnale presenta dei picchi in corrispondenza di determinate lunghezze d'onda a prescindere dall'intensità della radiazione incidente.

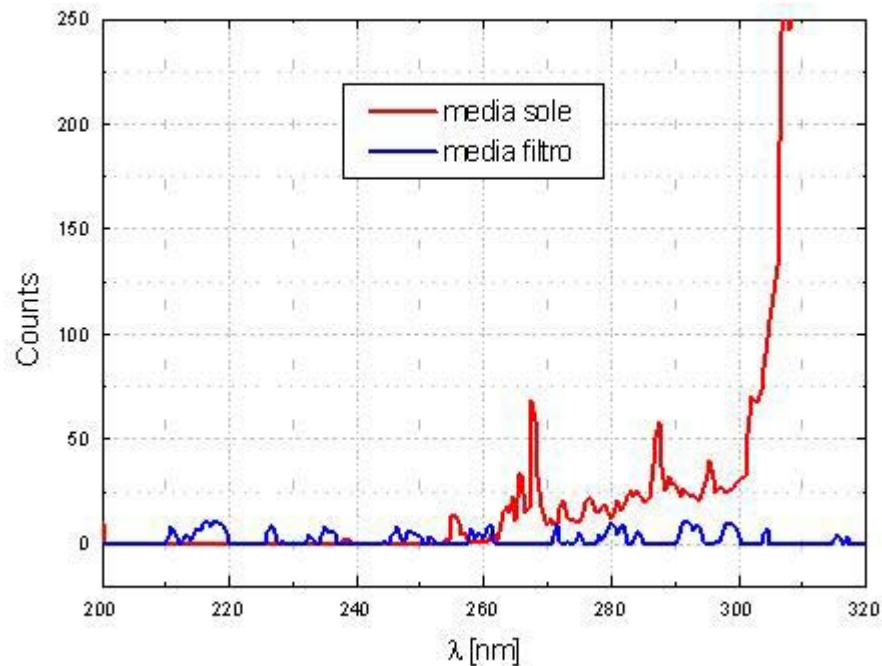
È stato a questo punto ritenuto necessario confrontare tale segnale con quello misurato in corrispondenza della luce emessa dalla sorgente standard NIST al fine di caratterizzare la stray light dello strumento.

In prima approssimazione è stata eseguita una media dei segnali presenti nelle Fig.4.20 e Fig.4.21, solo per individuare le posizioni dei picchi di segnale dovuti a stray light.

Questo tipo di analisi ovviamente non tiene conto in alcun modo dell'intensità della radiazione misurata, ma solo delle posizioni dei picchi.

Osservando le Fig.4.16 e la Fig.4.21 è possibile notare che i picchi di stray light sono situati sostanzialmente in corrispondenza di determinate lunghezze d'onda. È stata quindi eseguita una media delle tre misure di Fig.4.16 ed è stata

confrontata con la media dei segnali di Fig. 4.21. Il risultato che si ottiene è rappresentato in Fig.4.22.



**Fig.4.22:** Confronto in conteggi delle medie dei segnali misurati in corrispondenza della lampada NIST con il filtro taglia UV e della media dei segnali misurati di radiazione solare ad orari diversi.

È interessante notare che i due segnali presentano dei picchi in posizioni differenti l'uno rispetto all'altro.

Questo, come accennato in precedenza, illustra la difficoltà nella stima della stray light di uno spettroradiometro, dipendendo essa sia dalla sorgente stessa, che dall'intensità della radiazione incidente (anche se in misura minore, dal momento che dal confronto dei conteggi fra la Fig.4.15a e Fig.4.20, risulta che fra i due vi sia un fattore di circa 100, mentre i segnali di stray light sono confrontabili fra loro in intensità).

Occorrerebbe a questo punto affrontare uno studio più accurato della questione, sfruttando anche informazioni sulle misure di radiazione solare ottenute ad angoli diversi per caratterizzare a fondo lo spettroradiometro, ma questo esula dal contesto di questa tesi.



#### 4.5 Verifica della legge coseno

In questo paragrafo viene presentata una verifica sperimentale della legge del coseno (legge di Lambert) enunciata nel primo capitolo.

I dati che sono stati utilizzati sono gli stessi che sono serviti per la caratterizzazione della stray light, sono cioè i dati di radiazione solare ottenuti il 14 luglio in funzione dell'orario di misura.

È stato però necessario convertire l'orario di misura nell'angolo sotteso dal sole nella volta celeste.

A tal fine è stato utilizzato un software trovato su internet ([www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html](http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html)).

Il programma, in base al giorno di misura, all'orario e alla latitudine e longitudine del luogo di misura, converte l'orario in SZA.

La latitudine e la longitudine utilizzate sono quelle di Pisa e corrispondono rispettivamente a: 43.72° Nord ed a 10.33° Est.

La corrispondenza trovata fra gli orari di misura e i SZA calcolati è disponibile nella tabella 4.12.

**Tabella 4.12:**Corrispondenza fra orari di misura (14/07/2005,Pisa) e SZA

orario	SZA[°]	orario	SZA[°]	orario	SZA[°]
10:43	30,4589	12:49	22,6848	15:34	44,8302
10:48	29,7596	13:08	23,8848	15:52	47,0123
11:01	28,0348	13:16	24,5616	15:57	48,9033
11:29	24,8947	13:41	27,2194	16:14	51,9495
11:48	23,3453	14:22	32,8745	16:19	52,8492
11:56	22,8644	14:32	34,4211	16:36	55,9160
12:15	22,1823	14:52	37,6492	16:42	56,8877
12:21	22,1089	15:05	39,8240	16:56	59,5302
12:41	22,3684	15:27	43,6060	17:01	60,4333

In base alla legge di Lambert (vedi eq.1.14) si ha che la radiazione incidente sul diffusore (la cui superficie è in posizione normale rispetto alla terra) è proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza. Considerato che questo angolo è il SZA calcolato, il segnale misurato (normalizzato) dovrebbe essere proporzionale a  $\cos(\text{SZA})$ .



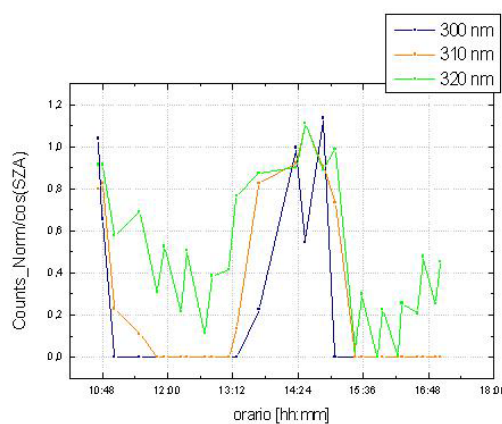
Il segnale misurato è stato normalizzato perchè per la verifica sperimentale della legge di Lambert la sorgente dovrebbe avere la stessa intensità per ogni angolo di misura [Nato ASI series].

A questo punto sono stati eseguiti i grafici del rapporto fra i segnali misurati ad alcune lunghezze d'onda e il coseno del SZA calcolato in funzione dell'orario di misura e quindi del SZA.

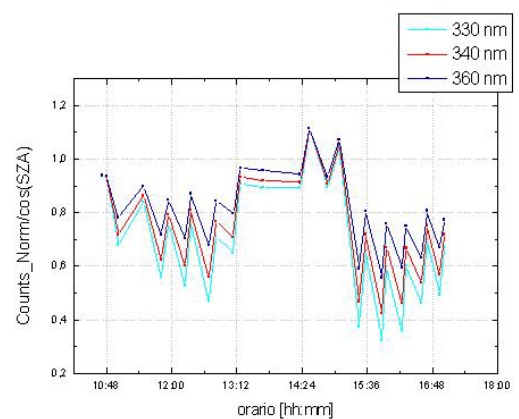
Il valore di tale rapporto, se dovesse essere rispettata tale legge, dovrebbe essere pari ad una costante.

Le lunghezze d'onda scelte sono le seguenti: 300nm, 310nm, 320nm, 330nm, 340nm, 360nm, 400nm, 450nm, 550nm, 700nm, 800nm e 840nm.

In Fig.4.23a si riportano le curve corrispondenti alle lunghezze d'onda di 300nm, 310nm e 320nm. Mentre nella Fig. 4.23b sono presenti le curve corrispondenti alle lunghezze d'onda di 330nm, 340nm e 360nm.

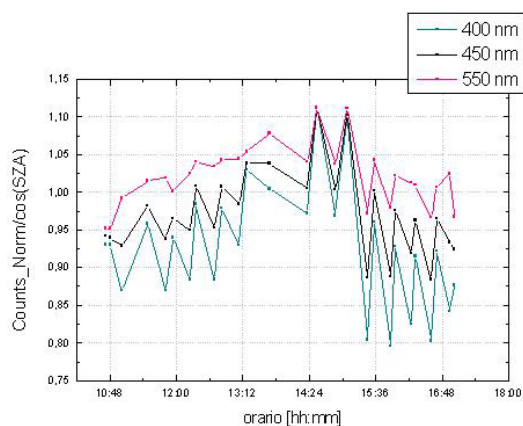


**Fig.4.23a:** Rapporto fra i segnali misurati alle lunghezze d'onda di 300nm, 310nm e 320nm e il coseno del SZA di misura.

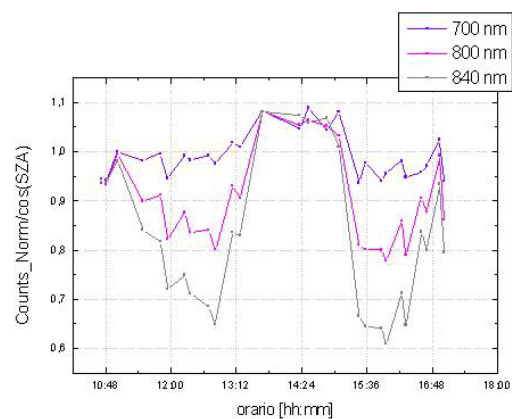


**Fig.4.23b:** Rapporto fra i segnali misurati alle lunghezze d'onda di 330nm, 340nm e 360nm e il coseno del SZA di misura.

Nei due grafici sottostanti vengono proposti i risultati ottenuti per le lunghezze d'onda di 400nm, 450nm e 500nm (Fig.4.24a) e per 550nm, 700nm e 840nm (Fig.4.24b).

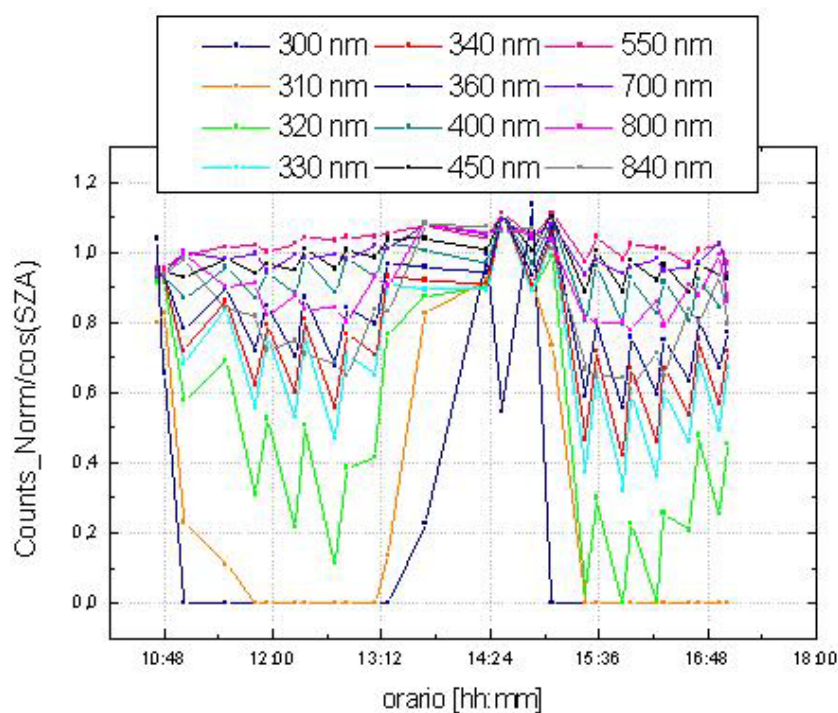


**Fig.4.24a:** Rapporto fra i segnali misurati alle lunghezze d'onda di 400nm, 450nm e 550nm e il coseno del SZA di misura.



**Fig.4.24b:** Rapporto fra i segnali misurati alle lunghezze d'onda di 700nm, 800nm e 840nm e il coseno del SZA di misura.

Per completezza si riportano in Fig.4.25 tutte le misure effettuate per un ulteriore confronto.



**Fig.4.25:** Rapporto fra i segnali misurati alle lunghezze d'onda indagate precedentemente.

#### **4.5.1 Conclusioni**

Dal confronto dei grafici precedenti è possibile notare che per le lunghezze d'onda di 300nm, 310nm e 320nm il segnale misurato prima delle 13:30 e dopo le 14:30 è troppo debole, per lunghezze d'onda maggiori, ma soprattutto intorno ai 500nm, il rapporto fra segnale normalizzato e coseno di SZA assume un valore quasi costante. L'orario comunque migliore per eseguire delle misure risulta essere compreso fra le 13:00 circa e le 14:30 (intorno al periodo della metà di luglio).

#### **4.6 Instabilità in $\lambda$**

In questo paragrafo viene presentato lo studio portato a termine sulla incertezza associata alla determinazione della lunghezza d'onda.

In particolare, come già accennato, è stata studiata l'influenza della temperatura ambientale sulla determinazione della lunghezza d'onda durante la fase di calibrazione spettrale.

In realtà questo studio è stato eseguito sullo spettroradiometro SAIR utilizzando il diffusore piano in teflon compresso. La maggiore differenza fra i due strumenti risiede nella presenza dello shutter automatico (presente nello SAIR) e dall'utilizzo in fase di calibrazione radiometrica di una differente ottica di ingresso (lo spettroradiometro SAIR utilizza un diffusore sferico compensato per la legge del coseno e una fibra ottica lunga 10m, mentre lo SMED utilizza il diffusore piano e una fibra ottica lunga 2m).

Durante la fase di calibrazione spettrale però entrambi gli strumenti hanno fatto uso del diffusore piano.

È presumibile dunque, dal momento che i componenti interni sono gli stessi, che lo studio seguente sia altrettanto valido per entrambi gli spettroradiometri.

Le misure sono state eseguite il 5 dicembre 2005 alla sede della Flyby a Livorno, dove è presente un condizionatore in grado di regolare la temperatura ambientale piuttosto velocemente.

La lampada utilizzata è stata la lampada portatile al mercurio.

La procedura di misura è la seguente: sono state eseguite una serie di misure quando lo strumento è stato appena acceso e la temperatura ambiente è risultata essere pari a 22°C. A questo punto sono stati calcolate le posizioni dei centri delle righe della

misurati con lo spettroradiometro in corrispondenza delle acquisizioni della luce emessa dalla lampada a mercurio.

Lo strumento è stato quindi utilizzato per effettuare altre prove (in particolare sono stati confrontati i risultati di alcuni files di calibrazione spettrale).

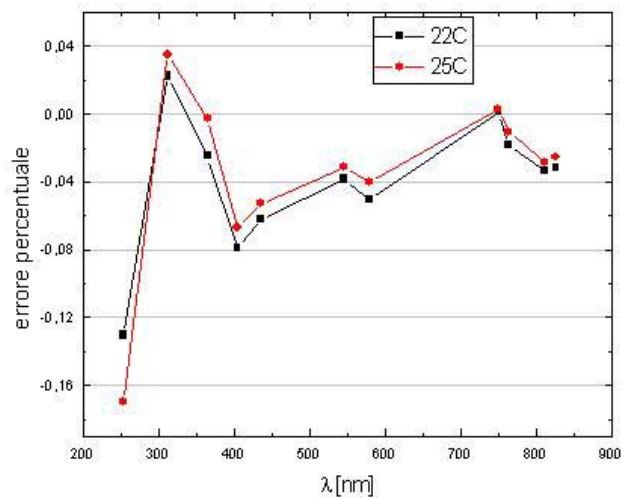
Quando la temperatura ambiente ha raggiunto i 25C, è stata acquisita un'altra serie di misure in corrispondenza della luce emessa dalla lampada a mercurio (naturalmente è stato reinserito nel software dello strumento lo stesso file di calibrazione utilizzato per eseguire le misure a 22C).

Sono quindi state stimate nuovamente le posizioni delle righe della lampada.

Le posizioni delle righe, per semplicità, sono state ricavate tramite l'utilizzo dei fit gaussiani delle stesse.

I risultati si trovano nei grafici seguenti.

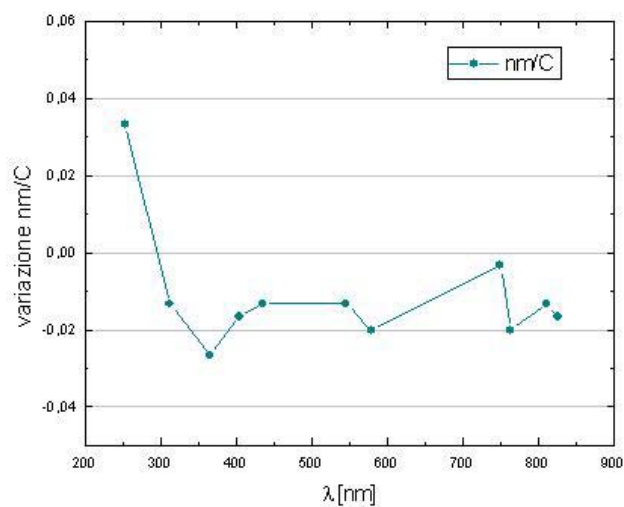
Nella Fig. 4.26 si trovano gli errori percentuali commessi nelle due stime delle posizioni dei centri delle righe.



**Fig.4.26:** Errore percentuale commesso nella stima della posizione dei centri delle righe della lampada a mercurio in funzione della temperatura ambientale.

L'errore percentuale sulla stima della posizione della riga della lampada al mercurio, rimane inferiore allo 0.1%, tranne che in un caso isolato dove non arriva al 0.2%.

In Fig.4.27 si riporta invece la variazione in nm/C. Questa è stata ricavata eseguendo il rapporto fra la variazione in nm fra le due misure e la variazione in temperatura dell'ambiente circostante [Kostkowski,1997].



**Fig.4.27:** Variazione in nm indotta da una variazione di 3C sulla temperatura ambiente.

Nella tabella 4.13 si riportano per maggior chiarezza i risultati ottenuti in tale elaborazione.

**Tabella4.13:** Tabella riassuntiva delle elaborazioni sopra eseguite.

Centri Righe bibl. [nm]	Centri Righe 22C [nm]	Errore % 22C	Centri Righe 25C [nm]	Errore % 25C	Differenza 22C-25C [nm]	Variazione nm/C
253,65	253,32	-0,13027	253,22	-0,16981	0,1	0,03333
312,6	312,67	0,02239	312,71	0,03518	-0,04	-0,01333
365	364,91	-0,02466	364,99	-0,00274	-0,08	-0,02667
404,7	404,38	-0,07913	404,43	-0,06676	-0,05	-0,01667
435,8	435,53	-0,06199	435,57	-0,0528	-0,04	-0,01333
546,1	545,89	-0,03847	545,93	-0,03114	-0,04	-0,01333
579,1	578,81	-0,0501	578,87	-0,03973	-0,06	-0,02
750,4	750,41	0,00133	750,42	0,00267	-0,01	-0,00333
763,5	763,36	-0,01834	763,42	-0,01048	-0,06	-0,02
811,5	811,23	-0,03328	811,27	-0,02835	-0,04	-0,01333
826,45	826,19	-0,03147	826,24	-0,02542	-0,05	-0,01667

#### 4.6.1 Conclusioni

Come già accennato la temperatura non influisce in maniera significativa sulla determinazione delle posizioni dei centri delle righe della lampada al mercurio.

Si può pertanto concludere che lo strumento utilizzato sia stato ben calibrato spettralmente.

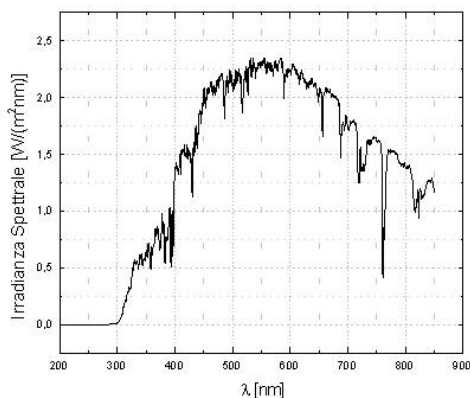
Si propone quindi nella tabella 4.14 l'errore definitivo associato alla procedura di calibrazione spettrale.

Tale errore è quindi l'incertezza da associare alla determinazione della lunghezza d'onda.

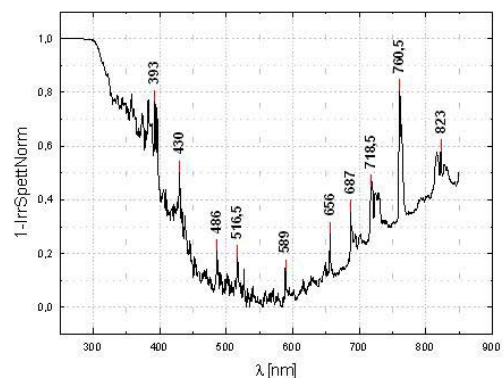
Per concludere si dimostra nel grafico seguente la buona calibrazione spettrale ottenuta, riportando la curva di irradianza spettrale misurata il 27 ottobre 2005 alla sede A.R.P.A.T.

Nel grafico sono presenti la curva di irradianza spettrale (Fig.4.28a) e la curva corrispondente a  $1-(\text{Irradianza Spettrale normalizzata})$  (Fig.4.28b) con le etichette dei picchi misurati.

La scelta di graficare tale curva è stata adottata per semplicità, dal momento che in questo modo la funzione "pick peaks" del software di elaborazione dati ORIGIN è stata in grado di determinare automaticamente le posizioni dei picchi (che altrimenti, sulla curva di Fig. 4.28a, non è in grado di fare).



**Fig.4.28a:** Curva di irradianza spettrale solare misurata il 27 ottobre 2005.



**Fig.4.28b:** Curva normalizzata di Fig.4.25a, con le etichette corrispondenti ai picchi misurati.

Dal confronto delle etichette in Fig. 4.29b con la tabella 1.1 dei valori in lunghezza d'onda delle righe di Fraunhofer, si evince che l'accordo è soddisfacente e si ritrovano nello spettro misurato numerose righe di Fraunhofer.

**Tabella4.14:** Incertezza associata alla determinazione della lunghezza d'onda.

<b>Valori da bibliografia [nm]</b>	<b>Metodo del centroide [nm]</b>	<b>Errore %</b>	<b>Errore Temp. %</b>	<b>Errore Totale %</b>
<b>253.6</b>	253.36	0.09	0.2	0.2
<b>312.6</b>	312.69	-0.03	0.04	0.05
<b>365</b>	365.08	-0.02	0.02	0.03
<b>435.8</b>	435.61	0.04	0.08	0.09
<b>546.1</b>	546.00	0.02	0.05	0.05
<b>763.5</b>	763.39	0.01	0.02	0.02

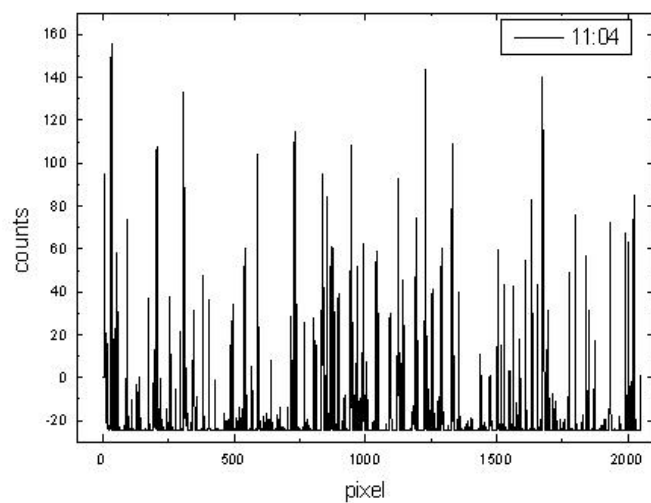
#### **4.7 Stabilità del rivelatore**

In questo paragrafo vengono presentati i risultati dell'indagine compiuta sulla stabilità del rivelatore, ossia il sensore CCD.

A tal fine sono stati utilizzate le misure di background ottenute durante una giornata di misura.

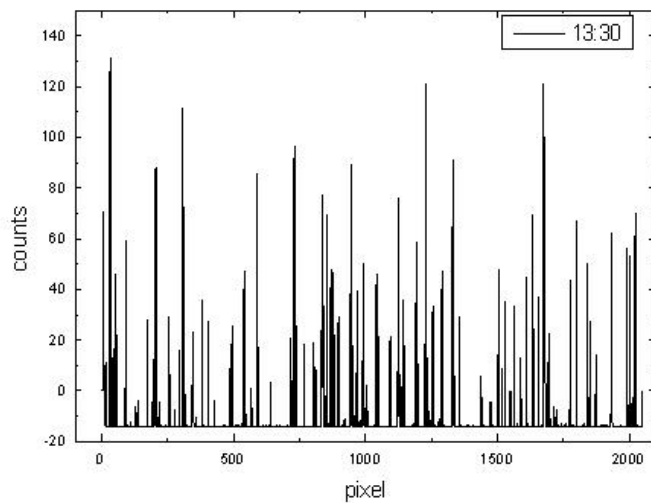
La giornata a cui si fa riferimento è quella corrispondente al 14 luglio, ossia la giornata in cui sono state eseguite misure di radiazione solare dalla mattina alla sera. Questo ha permesso di indagare l'influenza che ha l'accensione dello strumento per circa 7 ore consecutive sul segnale di fondo.

Nei grafici seguenti si riportano i segnali di background misurati a tre orari distinti.



**Fig.4.29:** Misura di background eseguita alle ore 11:04.

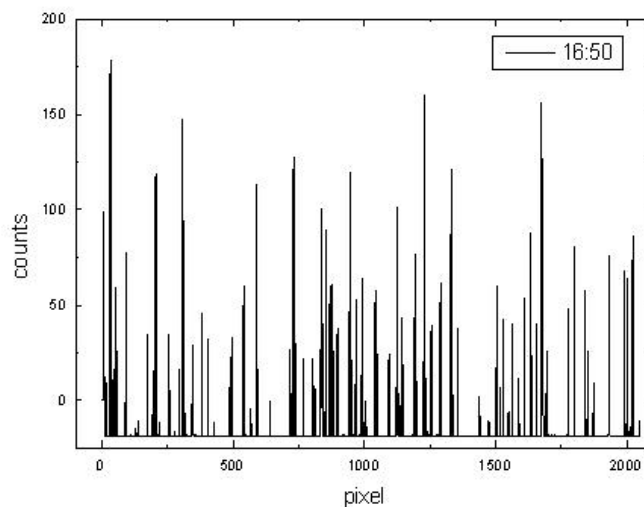
Gli altri background sono stati ottenuti dopo aver eseguito altre misure.



**Fig.4.30:** Misura di background eseguita alle ore 13:30.

L'ultima misura è stata ottenuta alle 16.





**Fig.4.31:** Misura di background eseguita alle ore 16:50.

#### **4.7.1 Conclusioni**

Come si può osservare le tre misure di background sono assolutamente confrontabili fra loro, il che dimostra che l'influenza sia della temperatura ambientale che del tempo di accensione dello strumento non influiscono sul rumore di fondo dello strumento.

### **4.8 Stabilità della sorgente NIST**

In questo paragrafo si riporta lo studio eseguito sulla stabilità della sorgente di calibrazione radiometrica NIST.

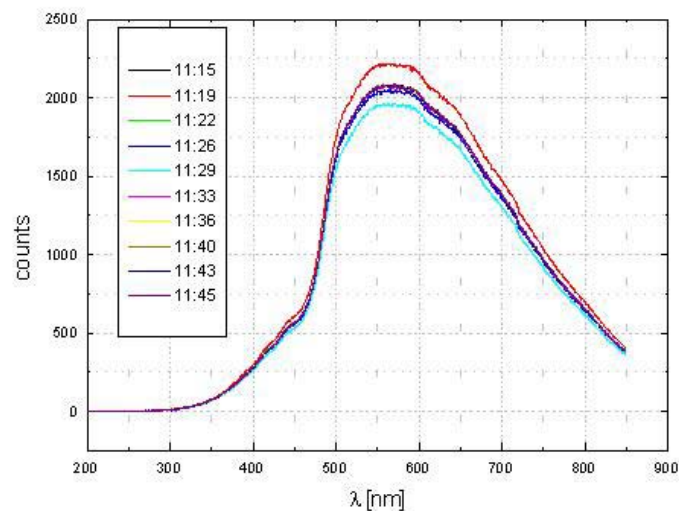
Come prima prova sono state eseguite delle misure in conteggi della radiazione emessa dalla sorgente non appena essa è stata accesa.

Sul rapporto che accompagna la lampada è riportato che la sorgente raggiunge una situazione di regime stazionario dopo circa 15 minuti dall'accensione.

Le misure sono state eseguite il 9 giugno 2005 all'interno del laboratorio del C.N.R.

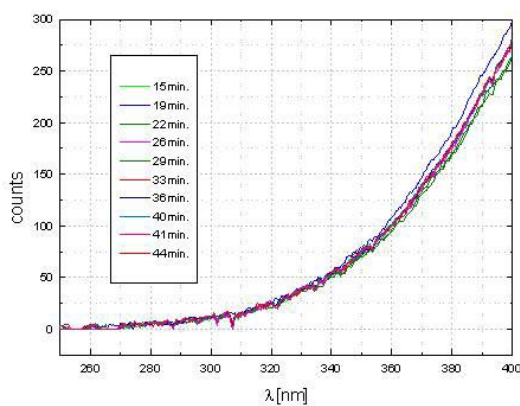
Eseguendo misure ogni 3 minuti circa è stato possibile verificare tale affermazione.

In Fig.4.32 si riporta il grafico delle curve misurate a partire dalle ore 11:15 fino alle ore 11:45.

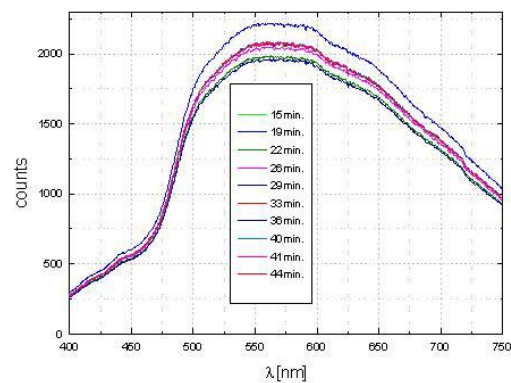


**Fig.4.32:** Misure della sorgente NIST ad intervalli di tempo regolari dal momento dell'accensione.

In Fig.4.33 si riportano due particolari della Fig.4.32 in due intervalli spettrali distinti.



**Fig.4.33a:** Particolare della Fig. 4.29 nell'UV.



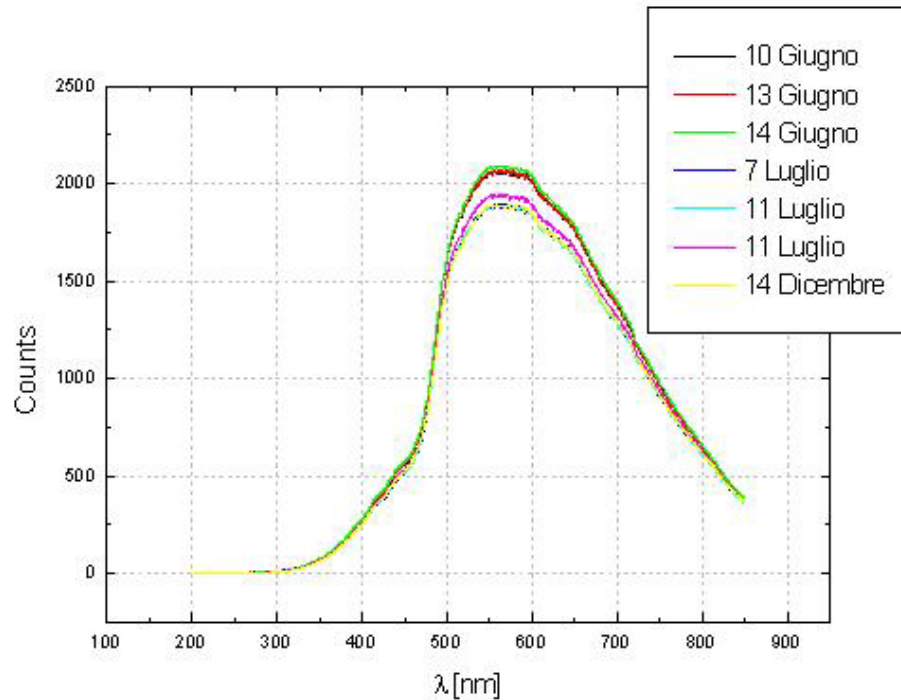
**Fig.4.33b:** Particolare della Fig. 4.29 nel VIS.

Osservando la Fig. 4.33 è stato possibile verificare che la lampada NIST, dopo 18 minuti dall'accensione, raggiunge una situazione di stabilità di emissione.

Durante tutta la serie caratterizzazioni e calibrazioni che sono state eseguite in seguito è stato quindi aspettato un periodo di tempo pari a 20 minuti prima di eseguire ogni misura.

A questo punto è stato eseguito il confronto fra le misure in conteggi eseguite nel periodo di tempo che va da giugno fino a dicembre.

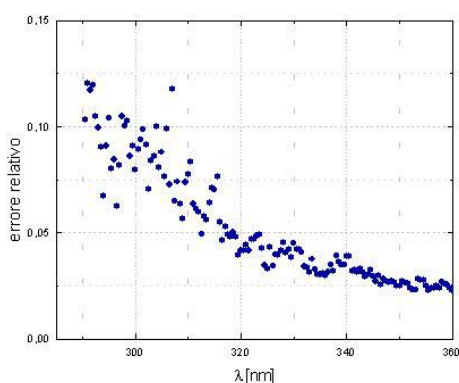
In Fig.4.34 si riportano le curve ottenute con anche visualizzata la media di tali misure.



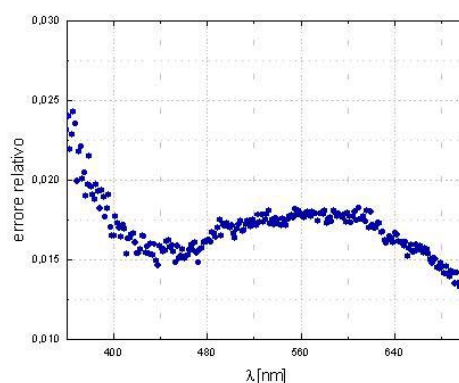
**Fig.4.34:**Misure in conteggi della sorgente NIST ottenute fra giugno e dicembre.

Si può notare che le due misure ottenute a giugno hanno un numero di conteggi maggiore nell'intervallo spettrale corrispondente al visibile.

Comunque nella Fig.4.35 si riportano gli errori relativi in due diversi intervalli spettrali.



**Fig.4.35a:** Errore relativo UV associato alla stabilità della sorgente NIST.



**Fig.4.35b:** Errore relativo VIS associato alla stabilità della sorgente NIST.

#### 4.8.1 Conclusioni

Si riporta nella tabella che segue l'errore associato alla ripetibilità della lampada NIST. Tale errore può essere imputato alle ore di utilizzo della lampada stessa durante il periodo di utilizzo della stessa durante questo lavoro di tesi. Al di sotto di 300nm l'errore dominante è quello statistico, pari al 30%, mentre al di sotto di 320nm l'errore statistico associato è pari al 15%. Per lunghezze d'onda maggiori di 400nm gli errori sono confrontabili con quelli forniti direttamente dal NIST (Tabella1.2).

**Tabella4.15 :** Errori percentuali associati all'uso della lampada NIST.

	300nm	325nm	400nm	700nm
<b>Errore Percentuale</b>	10%	5%	1%	1%

#### 4.9 Conclusioni

In questo paragrafo vengono presentate le conclusioni relative alla fase di caratterizzazione dello spettroradiometro SMED portata a termine nel presente capitolo.

Per quanto riguarda la ripetibilità della misura si riporta la tabella conclusiva degli errori statistici ad essa associati.

**Tabella4.4:** Errori percentuali medi associati alla ripetibilità della misura

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	30%	15%	5%	3%

La stima dell'errore associato al mal posizionamento del diffusore rispetto alla sorgente standard, i risultati sono riassunti nella tabella seguente.

**Tabella4.9:** Errori percentuali associati al mal posizionamento del diffusore

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	10%	2%	1%	1%

La terza sorgente di errore analizzata è stata l'incertezza associata alla corretta determinazione della lunghezza d'onda.

I risultati sono riportati nella tabella seguente. Come si può notare, essi sono trascurabili rispetto alle altre fonti di errore.

**Tabella4.16:** Errori percentuali associati alla determinazione della lunghezza d'onda.

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	0.05%	0.05%	0.09%	0.02%

L'ultima sorgente di errore analizzata è quella dovuta all'utilizzo stesso della lampada NIST; nella tabella seguente sono riportati i risultati ottenuti.

**Tabella4.15 :** Errori percentuali associati all'uso della lampada NIST.

	<b>300nm</b>	<b>325nm</b>	<b>400nm</b>	<b>700nm</b>
<b>Errore Percentuale</b>	10%	5%	1%	1%

Complessivamente dunque, l'incertezza associata alle misure con lo SMED è dominata dall'errore statistico, soprattutto per lunghezze d'onda minori di 320nm.

Questo è dovuto principalmente al fatto che al fine della calibrazione è stata utilizzata una lampada con una debole emissione nell'intervallo spettrale compreso fra 250nm e 330nm e il numero di conteggi pertanto non è elevato.

Anche avvicinando il diffusore alla lampada, al fine di ottenere un segnale più intenso, sono sorti altri problemi di natura sperimentale che hanno reso difficoltosa la misura, come si nota dai grafici di Fig.4.8 fino a Fig.4.12.

D'altra parte, le misure di radiazione solare non sono utilizzabili come sorgente stabile per una calibrazione di questo tipo.

Sarebbe pertanto utile riuscire ad utilizzare una sorgente di radiazione ultravioletta standard più intensa della lampada alogena, ad esempio una lampada al deuterio [Saunders,1977].

Come ulteriore precisazione è possibile affermare che lo SMED (con il diffusore in teflon compresso piatto e la fibra ottica lunga 2m) segue abbastanza fedelmente la legge del coseno.

La caratterizzazione della quantità di stray light necessita di uno studio più accurato, pertanto per quanto riguarda l'utilizzo dello SMED che ne è stato fatto durante questa tesi (vedi misure di albedo nel capitolo successivo) è sufficiente utilizzare la stima in prima approssimazione fornita dal software stesso.

Tale stima sottrae il segnale misurato nell'intervallo spettrale fra 240nm e 245nm a tutte le misure eseguite.

Si ricorda infatti che la radiazione solare viene assorbita dall'ozono stratosferico per lunghezze d'onda minori di 280nm e comunque la sorgente standard non emette al di sotto di 250nm.

Il segnale di background non influisce sulle misure, essendo indipendente sia dalla lunghezza d'onda che dal tempo di accensione dello strumento stesso.

## **5 MISURE DI ALBEDO**

### **5.1 Introduzione**

In questo capitolo vengono presentati i risultati delle misure di albedo ottenute durante i mesi di luglio e agosto 2005.

L'albedo è definito come il rapporto fra la radiazione globale orizzontale proveniente dal sole e la radiazione diffusa dal suolo.

Al fine di correlare i valori di irradianza solare misurati dal satellite con quelli registrati a terra è necessario conoscere i coefficienti di riflessione delle superfici incontrate dai raggi solari nel loro cammino. Per rispondere a questo proposito sono state svolte diverse campagne di misura che hanno portato alla determinazione dell'albedo di differenti superfici.

La regione interessata si estende dalla provincia di Massa e Carrara a quella di Livorno lungo una fascia di 10 KM dalla costa. E stato quindi necessario individuare le varie tipologie di superfici presenti nella regione suddetta e di queste studiarne l'albedo.

È stata inoltre studiata la variazione dell'albedo relativo a diverse superfici in funzione dell'orario di misura e della distanza del diffusore da terra.

L'elenco delle superfici indagate durante il presente lavoro è riportato nella tabella 5.1.

**Tabella 5.1:** albedi misurati e luogo di misura

<b>Tipo di superficie</b>	<b>Luogo di misura</b>
<b>Sabbia chiara</b>	Tirrenia (PI)
<b>Ghiaia bianca</b>	Marina di Pisa (PI)
<b>Asfalto</b>	Cortile arpat Pisa
<b>Erba</b>	Cortile arpat Pisa
<b>Grano tagliato</b>	S. Pietro a grado (PI)
<b>Campo arato</b>	S. Pietro a grado (PI)
<b>Terra battuta</b>	S. Pietro a grado (PI)

Lo strumento utilizzato è lo spettroradiometro SMED. Le misure ai fini della determinazione dell'albedo sono state ottenute in Irradianza Spettrale, pertanto per quanto riguarda l'errore sul segnale ricevuto si è utilizzato quello riportato nella tabella 4.19.

La procedura di misura è la seguente: per ogni tipo di superficie sono state eseguite misure in più punti ed per ogni punto di misura è stata considerata la media di tre acquisizioni.

Ogni albedo calcolato è il rapporto fra la media di tre misure con il diffusore rivolto verso la superficie da caratterizzare e la media di tre misure con il diffusore rivolto verso l'alto.

Al fine di effettuare le misure è stato reso disponibile dalla Flyby un cavalletto dotato di una piccola livella solidale al cavalletto stesso che ha consentito di porre il diffusore in posizione normale. Un'immagine del cavalletto è riportata in figura 5.1.





**Fig.5.1:** immagine del cavalletto utilizzato per le misure di albedo.

Lo schema generale per ogni misura di albedo è riassunto nei seguenti punti:

1. Misura della radiazione solare globale orizzontale: il diffusore è diretto verso l'alto in direzione del sole e viene calcolata la media di tre misure consecutive.
2. Misura della radiazione riflessa: il diffusore è rivolto verso il terreno in esame, anche in questo caso la misura viene ripetuta tre volte e ne viene calcolata la media. Se le acquisizioni sono fatte in conteggi è necessario, tramite una semplice proporzione, riportare le due misure (globale orizzontale e riflessa) ad un tempo di integrazione comune, (nelle misure in questione è stato scelto pari a 10000ms). Questo non è necessario se le misure ottenute sono in unità radiometriche.
3. Albedo: per ogni lunghezza d'onda si calcola il rapporto fra la misura riflessa e quella globale orizzontale e si ottiene una curva adimensionale in funzione della lunghezza d'onda.

Per ogni tipo di terreno esaminato viene realizzata un' apposita cartella di file. Tale cartella contiene i dati di albedo e delle foto del sito.

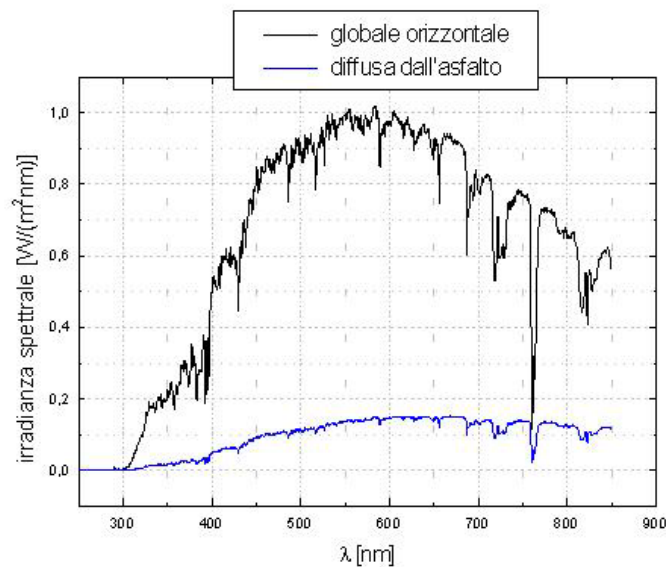
Nel paragrafo seguente viene riportato lo studio effettuato sull'influenza che ha l'altezza del diffusore dal suolo sulla misura di albedo.

Mentre l'ultima sezione contiene i risultati delle misure di albedo.

## 5.2 Misure di albedo in funzione dell'altezza del diffusore dal suolo

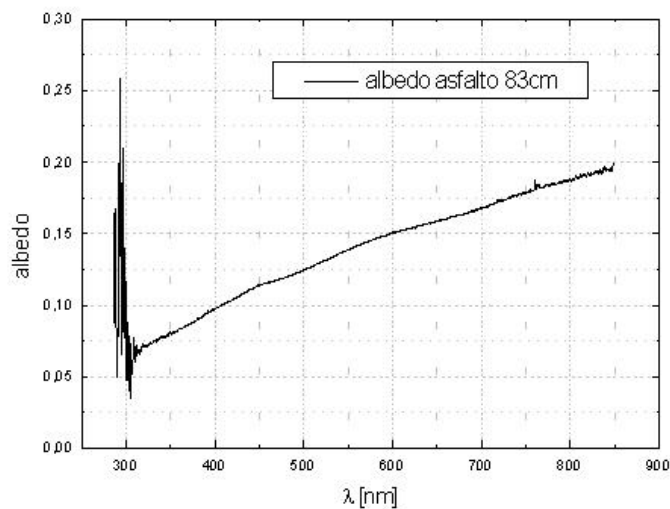
Tale studio è stato portato a termine il 14 luglio 2005 all'interno del cortile della sede A.R.P.A.T. di Pisa intorno alle ore 13:30 (ora legale).

Nelle Fig.5.2 si riporta le curve corrispondenti alla media dell'irradianza globale orizzontale misurata e quella corrispondente alla media delle misure di radiazione diffusa dall'asfalto.



**Fig.5.2:** Curve di irradianza spettrale globale orizzontale e diffusa dalla superficie asfaltata per un'altezza diffusore-superficie pari a 83cm.

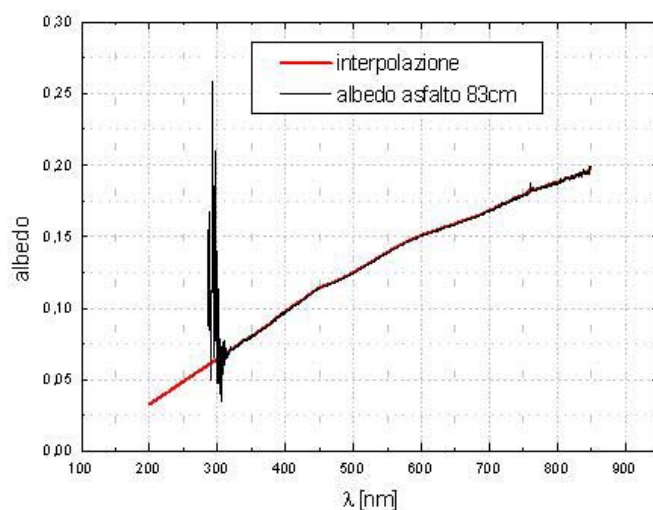
Nella figura 5.3 viene presentata la curva di albedo dell'asfalto relativa alla distanza diffusore-superficie pari a 83cm.



**Fig.5.3:** Curva di albedo dell'asfalto per una distanza diffusore-superficie pari a 83cm.

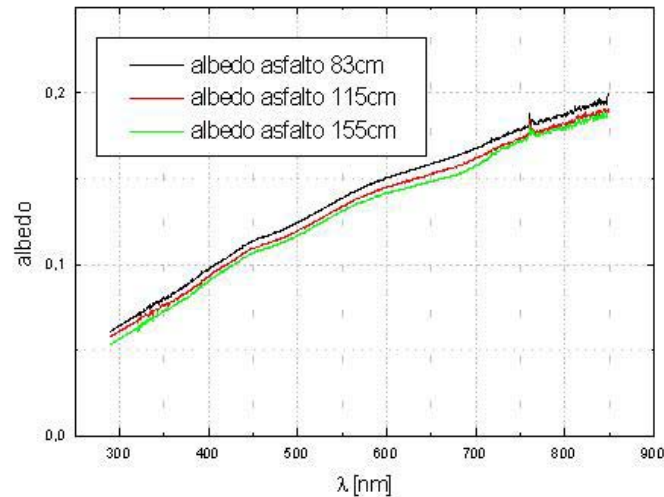
Come risulta evidente dalla Fig.5.3 i dati corrispondenti a lunghezze d'onda inferiori a 315nm, essendo affetti da un errore statistico non inferiore al 20%, non sono utilizzabili. È stato quindi eseguito un fit lineare sui dati compresi fra 340nm e 320nm e prolungato fino a 200nm.

Nella Fig.5.4 si riporta il risultato ottenuto.



**Fig.5.4:** Curva di albedo dell'asfalto per una distanza diffusore-superficie pari a 83cm con il fit lineare dei dati compresi fra 320nm e 340nm esteso all'intervallo spettrale che va da 200nm a 320nm.

Tutti gli albedi successivi sono stati corretti con questo procedimento. Si riporta ora in Fig.5.5 il confronto fra gli albedi dell'asfalto misurati a tre diverse distanze fra il diffusore e la superficie.



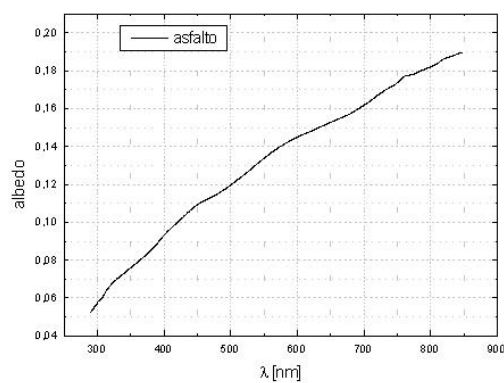
**Fig.5.5:** Albedi dell'asfalto misurati per diverse distanze diffusore-superficie.

### 5.3 Albedi misurati

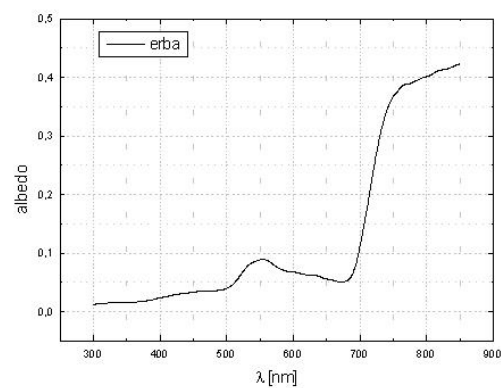
La misura dell'albedo dipende dall'altezza del diffusore rispetto al suolo, è stato pertanto deciso di allargare il più possibile i perni del cavalletto, mostrato in Fig.5.1, per raccogliere la maggior quantità di radiazione diffusa dal suolo possibile e di adattare l'altezza per una maggiore praticità.

L'altezza diffusore-superficie, adottata in tutte le misure successive, è stata scelta pari a 115cm.

Nelle Fig.5.6a e Fig.5.6b si riportano le curve di albedo relative alle superfici di asfalto e erba.

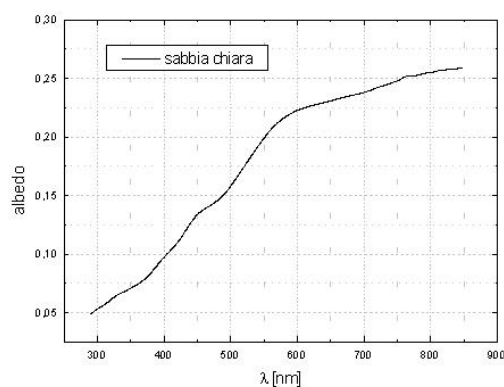


**Fig.5.6a:** Albedo dell'asfalto.

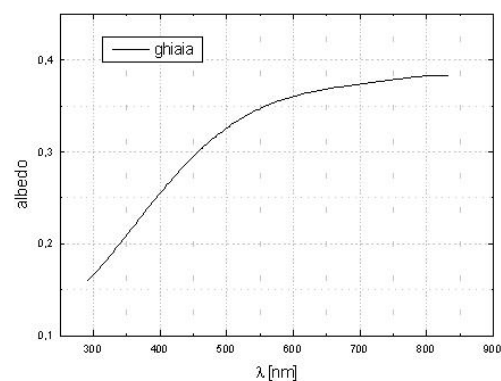


**Fig.5.6b:** Albedo dell'erba.

Nelle Fig.5.7a e Fig.5.7b si riportano le curve di albedo relative alle superfici di sabbia chiara e di ghiaia.

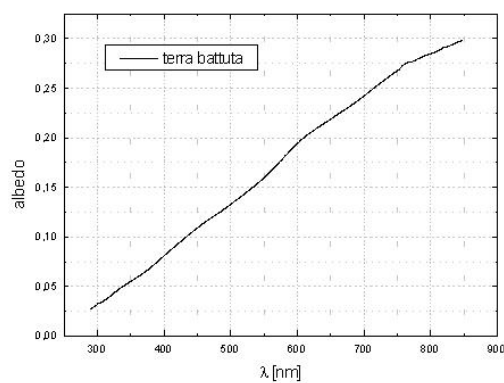


**Fig.5.7a:** Albedo della sabbia chiara.

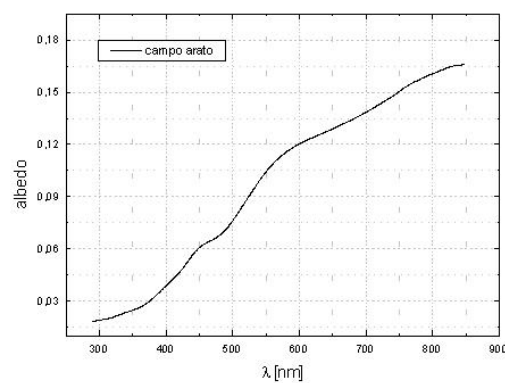


**Fig.5.7b:** Albedo della ghiaia.

Nelle Fig.5.8a e Fig.5.8b sono riportate le curve di albedo relative alle superfici di terra battuta e di un campo arato.

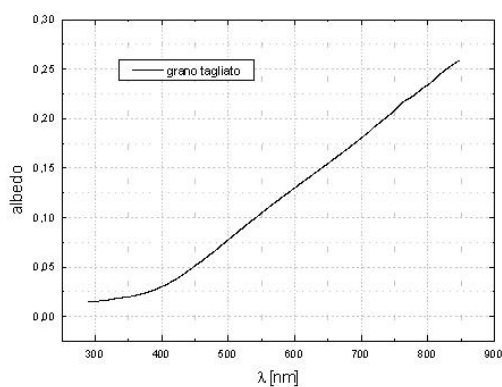


**Fig.5.8a:** Albedo della terra battuta.



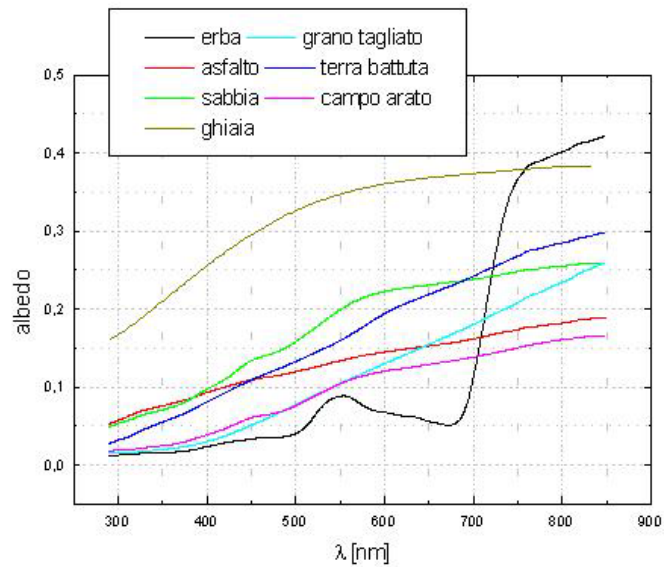
**Fig.5.8b:** Albedo di un campo arato.

L'ultimo albedo misurato è quello corrispondente alla superficie di un campo di grano tagliato ed è mostrato in Fig.5.9.



**Fig.5.9:** Albedo di un campo di grano tagliato.

Nella Fig.5.10 si riportano tutti gli albedi misurati.



**Fig.5.10:** albedi misurati

**Tabella5.2:** Valori da letteratura:

<b>Tipi di Superficie</b>	<b>Valore Misurato (320nm)</b>	<b>Valore Bibliografia (320nm)</b>
<b>asfalto</b>	0.0668	0.090
<b>Erba</b>	0.0141	0.030
<b>Sabbia</b>	0.0610	0.070
<b>Ghiaia</b>	0.1845	0.118
<b>Campo arato</b>	0.0206	-
<b>Grano tagliato</b>	0.0165	-
<b>Terra battuta</b>	0.0403	-

Nel caso dello SMED, e quindi degli albedi con esso misurati, gli errori da associare alle misure eseguite è non inferiore al 30%.

Risulta comunque evidente, osservando la Tabella 5.2, la necessità di effettuare misure in situ di albedo, data la difficile caratterizzazione delle superfici presenti in un determinato ambiente.

## **6 CONCLUSIONI**

Questa tesi, come precedentemente descritto, si proponeva come obiettivo la calibrazione e caratterizzazione dello spettroradiometro SMED (SpectraMED) di proprietà del C.N.R. di Pisa (sez. di biofisica), ideato e assemblato interamente dalla Flyby s.r.l. di Livorno.

È stato inoltre calibrato un altro spettroradiometro, SAIR (SpectrAIR), dalle caratteristiche analoghe allo SMED.

Una volta completata la calibrazione e la relativa caratterizzazione dello SMED, sono state eseguite le misure di albedo di diverse superfici.

Tutte le fasi precedenti sono state condotte in collaborazione dell'A.R.P.A.T. di Pisa. Sono state analizzate e quantificate le sorgenti di errore che influiscono sull'accuratezza della misura.

La procedura di calibrazione è stata portata a termine con successo in entrambi i casi. In particolare, dallo studio condotto sull'influenza di vari parametri (temperatura e stima delle posizioni dei centri delle righe della lampada di calibrazione spettrale utilizzata) è emerso che l'errore dovuto alla procedura di calibrazione spettrale adottata, è, per entrambi gli spettroradiometri, inferiore allo 0.1%.

Tale valore è assolutamente trascurabile rispetto ad altre sorgenti di errore analizzate nel corso della tesi svolta.



L'errore dovuto alla procedura di calibrazione in Irradianza Spettrale è stato calcolato minore del 15% per lunghezze d'onda superiori a 320nm, mentre per lunghezze d'onda minori l'errore statistico è stato valutato pari al 30%.

Dal momento che lo spettroradiometro dovrà poi misurare la radiazione solare per ricavare la quantità di ozono stratosferico, è stato ritenuto opportuno valutare l'influenza delle condizioni ambientali sulla misura stessa.

Sono stati pertanto analizzati gli errori dovuti alle caratteristiche ambientali (influenza del SZA sulla misura, posizionamento dell'apparato strumentale, temperatura) e quelli dovuti alle caratteristiche dello strumento (rumore di fondo, stray light). Alcune di queste caratterizzazioni hanno presentato una maggiore difficoltà di studio per la comparsa di problemi di natura logistica e strumentale e necessitano quindi di un ulteriore approfondimento che può essere materiale di studio futuro.

Lo studio eseguito sullo SMED ha portato alla conclusione che gli errori da associare ad ogni misura di radiazione solare sono inferiori al 13% per lunghezze d'onda comprese fra 320nm e 360nm, per lunghezze d'onda superiori, l'errore commesso è del 2-3%. A lunghezze d'onda inferiori lo SMED l'errore associato è non inferiore al 30%, dovuto essenzialmente dall'errore statistico sul numero di conteggi misurati, sia in fase di calibrazione che durante le misure.

Da quanto è emerso nello studio e caratterizzazione dello spettroradiometro, è possibile affermare che tutte le sorgenti di errore indagate portano ad un errore inferiore a quello statistico. Il segnale emesso dalla lampada QHT nell'intervallo spettrale dell'ultravioletto è decisamente troppo debole per poter portare a termine la calibrazione radiometrica senza che l'errore statistico domini.

Si propone quindi di utilizzare una lampada al deuterio, che ha un'emissione maggiore nell'UV, per ottenere un'incertezza minore in questo intervallo spettrale.

Lo studio svolto ha mostrato che sia lo SMED che lo SAIR sono in grado di rilevare e misurare le componenti spettrali della radiazione elettromagnetica comprese fra 320nm e 850nm con un errore medio inferiore al 5%.

Per quanto riguarda le misure di ozono, non è stato possibile attuarle, sia per motivi di natura atmosferica che di natura tecnica.

Le misure di albedo sono state portate a termine entro la fine di luglio e sono stati utilizzati dall'A.R.P.A.T. per fornire il servizio di protezione in funzione durante tutto il mese di agosto.

# Bibliografia

- [Arola,2002]: Arola,A. et al., Assesment of four methods to estimate UV radiation using satellite data, by comparison with ground measurements from four station in Europe, *J. Geophys.Res.*,107, D16,4310-4321, 2002.
- [Biggs,1993]: aa.vv., Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere, Springer,1993.
- [Born,1959]: Born,M.,Wolf, E. Principles of Optics, sesta ed., Pergamon Press, New York, 1980.
- [Croarkin,2001]: Croarkin,M.C., Statistics and Measurements, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **106**,1,279-292,2001.
- [Demtröder,1981]: Demtröder,W.,Laser Spectroscopy, seconda ed., Springer,1981.
- [Early,1998]: Early,A., Ambler Thompson, E., Disterhoft,P., Field calibration unit for ultraviolet spectroradiometers, *Appl. Opt.*, **37**,28,1998.
- [Early,1998]: Early,E. et al., The 1995 North American Interagency Intercomparison of Ultraviolet Monitoring Spectroradiometers, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **103**,15-62,1998.
- [env.UV Radiation]: Environmental UV radiation, commission of the European Communities, 1993.
- [Frederick,2000]: Frederick,J.E., Slusser,J.R., Bigelow,D.S., Annual and interannual Behavior of Solar Ultraviolet irradiance Revealed by Broadband measurements, *Photochem.Photobiol.*,**72**(4),2000.
- [Gallo,1995]: Gallo,P., Caratterizzazione di uno Spettroradiometro a “PhotoDiodeArray”, Tesi di Specializzazione, Pisa,1995.
- [Gardner,2004]: Gardner,J.L., Uncertainty aproagation for NIST Visible Spectral Standards, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **109**,3,305-318,2004.
- [Høiskar,2003]: Høiskar,B.A.,et al., Multichannel moderate-bandwidth filter instrument for measurements of the ozone-column amount, cloud transmittance, and ultraviolet dose rates, *Appl. Opt.*,**42**,18,2003.
- [Hutley,1982]: Hutley,M.C., Diffraction Gratings, Academic Press, 1982.
- [Kondratyev,2000]: Kondratyev,K.Y.,Varostos,C., Atmospheric ozone variability, Springer, 2000.
- [Kostkowski,1997]: Kostkowski,H.J., Reliable Spectroradiometry, Spectroradiometry Consulting, 1997.
- [Kylling,2000]: Kylling,A. et al., determination of an effective spectral surface albedo from ground-based global and direct UV irradiance measurements, *J. Geophys.Res.*,105, D4,4949-4959, 2000.
- [Kylling,2000]: Kylling,A., Dahlback,A.,Mayer,B., The Effect of Clouds and Surface Albedo on UV Irradiance at High Latitude Site, *Geophys.Res.Lett.*,**27**,1411-1414,2000.
- [Lantz,2002]: Lantz,K.,et al.,The 1997 North American Interagency Intercomparison of Ultraviolet Monitoring Spectroradiometers, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **107**,19-62,2002.
- [Larson,2001]: Larson,T.C., Cromer,C.L., sources of Error in UV Radiation Measurements, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **106**,4,649-656,2001.
- [manuale SONY]:manuale SONY sensore CCD.

[McCluney,1994]: McCluney,W.R., introduction to Radiometry and Photometry, Artech House, INC.,1994.

[man.JobinYvon]: manuale jobin Yvon

[NATO asi series]: aa.vv., Solar Ultraviolet Radiation, ed. C.S.Zerefos,A.F.Bais,lab.Atm.phys. Thessaloniki,1996.

[Nicodemus,1979]: Nicodemus,F.E., Kostjowski,H.J., Self-Study Manual on Optical Radiation Measurements, National Technical Information Service (NTIS), 1979.

[optotronic lab]: Slit and Aperture Selection in Spectroradiometry, App.Note, A11, 1995.

[oriel instr]: manuale Oriel Instr.

[Phillips,2001]: Phillips,S.D., et al., A Careful Consideration of the Calibration Concept, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **106**,2,371-379,2001.

[Slusser,1977]: Slusser,R.D. et al., Spectral irradiance standard for the ultraviolet: the deuterium lamp, *Appl.Opt.*,**17**,4,593-600,1977.

[Tsai,1997]: Tsai,K., Developments for a new Spectral Irradiance Scale at the National Institute of Standards and Technology, *J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol.* **102**,5,551-558,1997.

[Webb,1997]: Webb,A.R., Advances in solar ultraviolet spectroradiometry, European Commission, 1997.

[Xu,2000]: Xu,G. and Huang,X., Characterization and Calibration of broadband ultraviolet radiometers, *Metrologia*, **37**, 2000.